

Научная статья

УДК 631.344.8

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-15-20



РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА МЕТОДОМ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЛУЧИСТОГО ОБОГРЕВА ПОЧВЫ

Павлов Михаил Васильевич , канд. техн. наук, доцент,

Author ID SCOPUS57204361039; WoS Researcher ID AAN-5773-2021; ORCID ID 0000-0002-8687-3296; ID РИНЦ 564419; SPIN код 6544-7267; URL: pavlovmv@vogu35.ru

Карпов Денис Федорович , соискатель, старший преподаватель;

Scopus ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021; ORCID ID: 0000-0002-3522-9302; Scholar ID: gQUpifkAAAAJ; e-library ID: 564418 e-library SPIN: 9241-4996; ResearchGate: /www.researchgate.net/profile/Denis-Karpov-6; karpovdf@vogu35.ru
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. Представлена система дифференциальных уравнений (в размерном и безразмерном видах), отражающая взаимосвязь тепловых и массообменных процессов в коллоидных капиллярно-пористых телах в случае поверхностного лучистого обогрева. Рассмотрено частное аналитическое решение данной системы дифференциальных уравнений для полуграниченного тела при исключении явления термовлагопроводности и пародиффузионных процессов. На примере фрезерного торфа с учетом исходных данных получено решение краевой задачи теплопереноса методом источников, представляющее собой одномерные нестационарные поля влагосодержания и температуры. Установлено, что при заданных начальных и граничных условиях, а также с учетом теплофизических свойств фрезерного торфа достижение требуемого значения влагосодержания произойдет через 6 ч, температуры – через 3 ч. Регулируя тепловую мощность источника инфракрасного излучения, а значит, и интенсивность испарения влаги с поверхности почвы в окружающую среду, можно управлять скоростью прогрева и сушки слоя (например, для определения времени или периодичности полива почвы). Для уточнения значений влагосодержания и температуры почвы по координате и во времени представляется целесообразным рассмотрение аналитических решений, учитывавших не только основные, но и сопряженные процессы диффузии теплоты и массы.

Ключевые слова: температурно-влажностный режим, теплоперенос, метод источников, коллоидное капиллярно-пористое тело, лучистый обогрев, культивационное сооружение, теплица, почва, фрезерный торф

Формат цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Решение краевой задачи теплопереноса методом источников для условий лучистого обогрева почвы // Природообустройство. 2023. № 4. С. 15-20. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-15-20.

© Павлов М.В., Карпов Д.Ф., 2023

Original article

SOLUTION OF HEAT AND MASS TRANSFER BOUNDARY PROBLEM USING THE METHOD OF SOURCES FOR SOIL RADIANT HEATING CONDITIONS

Pavlov Mikhail Vasilyevich , candidate of technical sciences, associate professor;

Author ID SCOPUS57204361039; WOS Researcher ID AAN-5773-2021; ORCID ID 0000-0002-8687-3296; RSCI ID 564419; SPIN code 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

Karpov Denis Fedorovich , applicant, senior lecturer;

Scopus ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021; ORCID ID: 0000-0002-3522-9302; Scholar ID: gQUpifkAAAAJ; e-library ID: 564418; SPIN: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Vologda State University; 160000, Vologda, Lenin str., 15, Russia

Annotation. 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 emitters. A system of differential equations (in dimensional and dimensionless forms) is presented, reflecting the relationship of thermal and mass transfer processes in colloidal capillary-porous bodies in the case of surface radiant heating. A partial analytical solution of this system of differential equations for a semi-bounded body is considered with the exclusion of the phenomenon of thermal and thermal conductivity and period diffusion processes. On the example of milling peat, taking into account the initial data, the solution of the boundary value problem of heat and mass transfer by the method of sources is obtained, which is one-dimensional non-stationary fields of moisture content and temperature. It is established that under the given initial and boundary conditions, as well as taking into account the thermophysical properties of milling peat, the required moisture content will be achieved in six hours, the temperature in three hours. By adjusting the thermal power of the infrared radiation source, and, therefore, the intensity of moisture evaporation from the soil surface into the environment, it is possible to control the rate of heating and drying of the layer (for example, to determine the time or frequency of watering the soil). To clarify the values of moisture content and soil temperature by coordinate and over time, it seems expedient to consider analytical solutions that took into account not only basic, but also conjugate processes of heat and mass diffusion.

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

Format of citation: Pavlov M.V., Karpov D.F. Solution of heat and mass transfer boundary problem using the method of sources for soil radiant heating conditions // *Prirodoobustrojstvo*. 2023. № 4. P. 15-20. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-15-20.

Введение. Для благоприятного роста, развития и плодоношения растений, выращивания рассады в культивационных сооружениях (промышленных теплицах, оранжереях и т.п.) требуется поддерживать не только температуру и влажность воздуха в помещении, но и температурно-влажностный режим почвы [1]. Традиционные способы отопления, основанные на конвективном обогреве внутреннего воздуха с целью поддержания требуемых микроклиматических условий в культивационных сооружениях, имеют ряд недостатков [2]: нерациональные энергетические затраты на единицу выращенной сельскохозяйственной продукции; высокие первоначальные финансовые затраты на приобретение необходимого оборудования и материалов; тепловая инерционность системы обогрева и др. Однако такие технологии, как прогрев почвы с применением подземных трубопроводных систем, в которых циркулирует теплоноситель (горячая вода, водяной пар), также не зарекомендовали себя ввиду дороговизны и критических последствий в случае аварийной ситуации и тепловой инерционности инженерного оборудования. Поэтому применение потолочных инфракрасных излучателей в качестве источников теплоты в системах отопления культивационных сооружений становится все более актуальным [3].

Благодаря принципу действия, экологичности и энергоэффективности использования лучистый обогрев почвы с помощью источников инфракрасного излучения на сегодняшний день

является одним из самых совершенных и перспективных видов отопления в мире [4].

Материалы и методы исследований.

Вследствие создания новых способов обогрева культивационных сооружений вопросы нахождения, прогнозирования и регулирования температурно-влажностного режима почвы остаются открытыми и актуальными для теории теплообмена [5-8]. Для реализации подобного многогранного комплекса задач совершенно недостаточны принятые способы их формулирования, решения и анализа. Исходные уравнения и граничные условия, а, следовательно, и конечные формулы должны соответствующим образом отражать физику происходящих процессов [9]. Правильное решение подобных задач требует дополнительных знаний о теплофизических свойствах почвы, характеризующих способность материала к диффузии энергии и вещества, а также о теплообменных процессах, происходящих на границе раздела фаз «Почва-окружающая среда». Применение классических решений задачи теплопереноса для объекта исследования – почвы – с учетом особенностей лучистого отопления позволит предупредить возможные отклонения параметров среды от оптимальных (или допустимых) значений и предотвратить гибель сельскохозяйственной продукции.

Возможности прогнозирования температурно-влажностного режима почвы связаны с аналитическим описанием диффузии теплоты и массы в коллоидном капиллярно-пористом теле. «Отображение» реальных процессов,

происходящих в слое почвы с учетом внешних и внутренних факторов, заключается в составлении и решении системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений теплопереноса в частных производных [10]. Решение системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений представляет определенные математические трудности. Лишь в редких случаях удается получить точные аналитические решения [11].

Система дифференциальных уравнений теплопереноса при лучистом обогреве почвы имеет следующий вид (математический вывод данных уравнений представлен в работе [12]):

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

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

где W – влагосодержание, $\text{кг} / \text{кг}$; t – температура, $^{\circ}\text{C}$; τ – время, с ; a_w – коэффициент диффузии, $\text{м}^2 / \text{с}$; δ – термодиффузионный коэффициент, $1 / ^{\circ}\text{C}$; a_t – коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2 / \text{с}$; r – теплота парообразования, $\text{Дж} / \text{кг}$; ε – критерий фазового превращения; c_m – удельная массовая теплоемкость, $\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$.

Уравнение массопереноса (1) учитывает диффузию влаги за счет не только разности влагосодержаний W в двух координатах почвы (дифференциальный закон Фика), но и разности температур t (явление термовлагопроводности). Уравнение теплопереноса (2), включая дифференциальный закон теплопроводности Фурье, показывает, что с движением вещества (в виде водяного пара) также происходит перемещение тепловой энергии.

Дифференциальные уравнения теплопереноса (1) и (2) в безразмерной (критериальной) форме будут иметь соответственно вид (математический вывод данных уравнений представлен в работе [12]):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_{o_w}} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + Pn \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial F_{o_t}} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + Ko^* Lu \frac{\partial \Theta}{\partial F_{o_w}}, \quad (4)$$

где $\Theta = \frac{W_n - W}{W_n - W_k}$ – безразмерное влагосодержание; W_n и W_k – начальное и конечное влагосодержание почвы соответственно, $\text{кг} / \text{кг}$; $T = \frac{t - t_n}{t_k - t_n}$ – безразмерная температура; t_n и t_k – начальная и конечная температура почвы соответственно, $^{\circ}\text{C}$; $F_{o_w} = \frac{a_w \tau}{h^2}$ – массообменное число Фурье; $F_{o_t} = \frac{a_t \tau}{h^2}$ – 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 П основа; $Ko^* = \varepsilon Ko$ – модифицированное число Коссовича; $Ko = \frac{r\varepsilon(W_n - W_k)}{c_m(t_k - t_n)}$ – число Коссовича; $Lu = \frac{a_w}{a_t}$ – число Льюиса (Льюиса).

Результаты и их обсуждение. Дано полуограниченное тело – почва (рис. 1) при начальном влагосодержании $W_n, \text{кг} / \text{кг}$. С поверхности почвы в течение времени τ под воздействием лучистого обогрева испаряется влага в окружающую среду с интенсивностью во времени $i, \text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Изменение влагосодержания происходит в одном направлении – вдоль оси Oz . Требуется определить распределение влагосодержания $W(z, \tau)$.

При лучистом обогреве интенсивность испарения влаги с поверхности почвы может быть определена следующим образом [13]:

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

где β – коэффициент массоотдачи, $\text{кг} / (\text{Н} \cdot \text{с})$, который рассчитывается через критериальные уравнения подобия массообменных процессов либо приближенно вычисляется по формуле Льюиса [14]; p_n и p_c – соответственно парциальное давление водяного пара на поверхности почвы и вдали от нее (в окружающей среде), $\text{Н} / \text{м}^2$.

Задача массопереноса методом источников сводится к решению дифференциального уравнения (1) при отсутствии термодиффузии влаги, то есть при условии $\delta = 0$. В таком случае условия однозначности для решения задачи массопереноса в слое почвы будут иметь вид:

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

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

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

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

где ρ – плотность скелета почвы, $\text{кг} / \text{м}^3$.

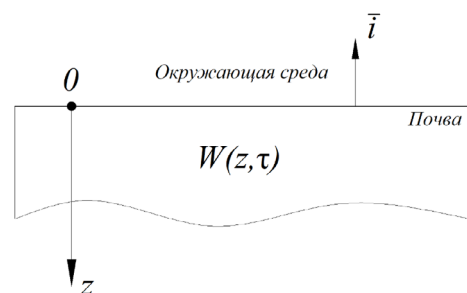


Рис. 1. Постановка краевой задачи массопереноса

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

Решение дифференциального уравнения (6) при начальных (7) и граничных (8), (9) условиях известно и имеет вид [15]:

$$W(z, \tau) = W_{\text{н}} - \frac{2i}{\rho} \sqrt{\frac{\tau}{a_w}} \text{ierfc}(u_1); \quad (10)$$

$$\text{ierfc}(u_1) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u_1^2} - u_1 \text{erfc}(u_1); \quad (11)$$

$$u_1 = \frac{z}{2\sqrt{a_w \tau}}; \quad (12)$$

$$\Theta = \frac{W_{\text{н}} - W(z, \tau)}{W_{\text{н}} - W_{\text{к}}} = 2Ki_w \sqrt{Fo_w} \text{ierfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_w}}\right), \quad (13)$$

где $Ki_w = \frac{iz}{a_w \rho (W_{\text{н}} - W_{\text{к}})}$ – массообменный критерий Кирпичева.

Представим решение краевой задачи массопереноса методом источников на примере фрезерного торфа (рис. 2) со следующими исходными данными: $\rho = 74 \text{ кг/м}^3$; $a_w = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; $W_{\text{н}} = 3,7 \text{ кг/кг}$; $W_{\text{к}} = 1,0 \text{ кг/кг}$; $i = 170 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

Дано полуограниченное тело – почва (рис. 3) при начальной температуре $t_{\text{н}}$, °С. Под воздействием лучистого обогрева плотностью q , Вт/м², поверхность почвы нагревается в течение

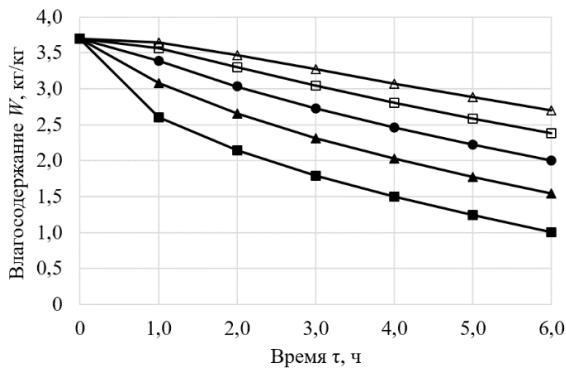


Рис. 2. Решение краевой задачи массопереноса: ■ – 0 мм; ▲ – 5 мм; ● – 10 мм; □ – 15 мм; △ – 20 мм
 Fig. 2. Solution of mass transfer boundary problem: ■ – 0 mm; ▲ – 5 mm; ● – 10 mm; □ – 15 mm; △ – 20 mm

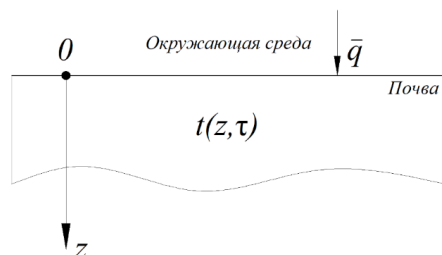


Рис. 3. Постановка краевой задачи теплопереноса

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

времени τ . Изменение температуры происходит в одном направлении – вдоль оси Oz . Требуется найти распределение температуры $t(z, \tau)$.

Величина плотности лучистого обогрева почвы может быть найдена через уравнение радиационного баланса поверхности почвы [16]:

$$q = \left(1 - \frac{A}{100}\right) q_{\text{inf}} - q_{\text{vp}} - q_{\text{conv}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (14)$$

где A – альbedo деятельной поверхности почвы, %; q_{inf} – плотность теплового потока от источника инфракрасного излучения, Вт/м²; q_{vp} – плотность теплового потока, расходуемая на испарение влаги с поверхности почвы (прямо пропорциональна интенсивности испарения влаги с поверхности почвы \dot{d}), Вт/м²; q_{conv} – плотность теплового потока в результате конвективного теплообмена между поверхностью почвы и окружающей средой, Вт/м², определяемая по уравнению Ньютона.

Задача теплопереноса методом источников сводится к решению дифференциального уравнения (2) при отсутствии пародиффузионных процессов, то есть при условии $\varepsilon = 0$. В таком случае условия однозначности для решения задачи теплопереноса в слое почвы будут иметь вид:

$$\frac{\partial t(z, \tau)}{\partial \tau} = a_t \frac{\partial^2 t(z, \tau)}{\partial z^2} \quad (\tau > 0; 0 < z < \infty); \quad (15)$$

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

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial z} + q = 0; \quad (17)$$

$$t(\infty, \tau) = t_{\text{к}}, \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (18)$$

где λ – коэффициент теплопроводности почвы, Вт/(м·К).

Решение дифференциального уравнения (15) при начальных (16) и граничных (17), (18) условиях известно и имеет вид [17]:

$$t(z, \tau) = t_{\text{н}} + \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a_t \tau} \text{ierfc}(u_2); \quad (19)$$

$$\text{ierfc}(u_2) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u_2^2} - u_2 \text{erfc}(u_2); \quad (20)$$

$$u_2 = \frac{z}{2\sqrt{a_t \tau}}; \quad (21)$$

$$T = \frac{t(z, \tau) - t_{\text{н}}}{t_{\text{к}} - t_{\text{н}}} = 2Ki_t \sqrt{Fo_t} \text{ierfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_t}}\right), \quad (22)$$

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

Представим решение краевой задачи теплопереноса методом источников на примере фрезерного торфа (рис. 4) со следующими исходными данными: $\lambda = 0,302 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $a_t = 14,84 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; $t_{\text{н}} = 5^\circ\text{C}$; $t_{\text{к}} = 20^\circ\text{C}$; $q = 100 \text{ Вт/м}^2$.

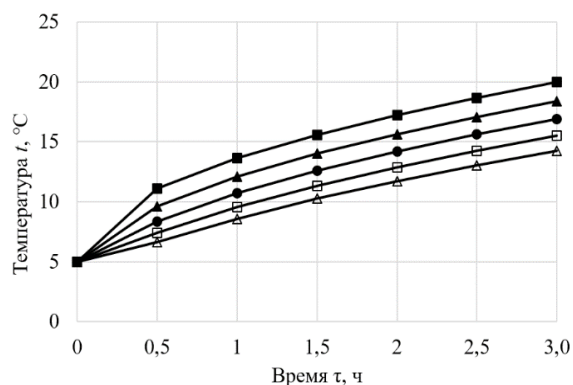


Рис. 4. Решение краевой задачи теплопереноса:
■ – 0 мм; ▲ – 5 мм; ● – 10 мм; □ – 15 мм; △ – 20 мм

Fig. 4. Solution of heat transfer boundary task:

■ – 0 mm; ▲ – 5 mm; ● – 10 mm; □ – 15 mm; △ – 20 mm

На основе системы уравнений (10-13) и (19-22) разработана программа для расчета температурно-влажностного режима почвы методом источников в математическом редакторе *Mathcad*.

Выводы

Аналитические методы решения краевой задачи теплопереноса, представляющие собой в рассматриваемом случае размерные и безразмерные функции (9), (12) и (17), (20), позволяют анализировать влияние исходных параметров (например, интенсивности испарения влаги с поверхности почвы или величины плотности теплового потока) на температурно-влажностный режим почвы. Последнее является определяющим фактором для формирования благоприятного микроклимата в культивационных сооружениях с целью выращивания рассады или для роста зелени, овощей и цветов в закрытом грунте. Кроме того, уравнение (9) может быть использовано в теоретических исследованиях сушки коллоидных капиллярно-пористых тел (например, измельченного, кускового, фрезерного торфа).

Список использованных источников

1. РД-АПК 1.10.09.01-14. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады: утв. врио директора Департамента научно-технологической политики и образования Минсельхоза России А.А. Вельматовым от 13 августа 2014 г. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 104 с.
2. Болотских Н.Н. Инфракрасный обогрев теплиц с помощью электрических длинноволновых нагревательных панелей // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 9 (140). С. 43-52.
3. Plichev 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.

Благодаря современным достижениям в области создания электронных вычислительных машин, работающих с большими объемами памяти при высоких скоростях обработки информации, результаты аналитических решений выдаются в течение непродолжительного промежутка времени без особых математических затруднений. Кроме того, аналитические методы весьма компактны, а вопрос сложности вычисления уходит на второй план в связи с разработкой математических редакторов, позволяющих проводить за считанные секунды по заданным уравнениям операции дифференцирования и интегрирования с рациональными, иррациональными, трансцендентными и сложными функциями.

Представленные решения краевой задачи теплопереноса (9) и (17), адаптированные для лучистого обогрева почвы, могут быть использованы для конкретно заданных условий. Критериальные уравнения (12) и (20) позволяют перейти к комплексным безразмерным величинам и получить обобщенные математические закономерности.

Ввиду исключения на данной стадии исследований влияния термовлагопроводности и пародиффузионных процессов при решении краевой задачи теплопереноса авторы планируют продолжить научные изыскания в области решения задач теплообмена, учитывавшие сопряженные процессы диффузии теплоты и массы. Представляет интерес рассмотрение решения краевой задачи теплопереноса методом интегрального преобразования Фурье, который учитывает пародиффузионные процессы в почве, а также методом совместного применения интегрального преобразования Лапласа и вариационного метода Бубнова-Галеркина (учитываются как пародиффузионные процессы, так и явление термовлагопроводности).

References

1. RD-APK 1.10.09.01-14. Guidelines for technological design of greenhouses and greenhouse plants for growing vegetables and seedlings: approved. Acting Director of the Department of Scientific and Technological Policy and Education of the Ministry of Agriculture of Russia Velmatorov A.A. from 13.08.2014. Moscow: FSBI "Rosinformagrotech". 2014. 104 p.
2. Bolotskih N.N. Infrared heating of greenhouses with the help of electric long-wave heating panels. Power engineering. Energy audit. 2015. № 9 (140). P. 43-52.
3. Plichev 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.
4. Kalegin I.V. Comparison and assessment of the effectiveness of types of heating of greenhouse

4. Калегин И.В. Сравнение и оценка эффективности видов отопления тепличных комплексов в зимний период // Вестник науки. 2020. № 7 (28). С. 75-85.

5. Бровка Г.П., Агутин К.А. Компьютерное моделирование теплового режима промерзающих торфяных почв // Природопользование. 2015. № 27. С. 159-166.

6. Хворова Л.А., Брыксин В.М., Скобова Т.С. Моделирование теплового режима почвы с учетом приходящей длинноволновой радиации // Известия Алтайского государственного университета. 2005. № 1 (35). С. 74-77.

7. Боярская А.В. Численное моделирование теплофизических параметров теплового режима почв // Прикладная математика и фундаментальная информатика. 2014. № 1. С. 135-139.

8. Яшин В.М., Глазунова И.В. Обоснование требований растений к регулированию водного режима почв и его контроль // Природообустройство. 2022. № 5. С. 15-21. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-15-21.

9. Микайылов Ф.Д., Шеин Е.В. Граничные условия при моделировании переноса тепла в почве // Агрофизика. 2014. № 4. С. 1-6.

10. Рысбайұлы Б., Карашбаева Ж.О. Влаго- и термофизические характеристики уравнения тепломассопереноса в почве // Вестник КазНПУ им. Абая. Серия «Физико-математические науки». 2021. № 4 (76). С. 51-58. DOI: 10.51889/2021-4.1728-7901.07.

11. Михайлов Ю.А., Глазунов Ю.Т. Вариационные методы в теории нелинейного тепло- и массопереноса. Рига: Зинатне, 1985. 190 с.

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

13. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.

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

15. Антонов В.Я., Малков Л.М., Гамаюнов Н.И. Технология полевой сушки торфа. М.: Недра, 1981. 239 с.

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

17. Лыков А.В. Теория теплопроводности: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

Критерии авторства

Павлов М.В., Карпов Д.Ф. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись.

Павлов М.В., Карпов Д.Ф. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023

Одобрена после рецензирования 16.05.2023

Принята к публикации 16.05.2023

complexes in the winter period // Bulletin of Science. 2020. № 7 (28). P. 75-85.

5. Brovka G.P., Agutin K.A. Computer modeling of the thermal regime of freezing peat soils // Nature use. 2015. № 27. P. 159-166.

6. Khvorova L.A., Bryksin V.M., Skobova T.S. Modeling of the thermal regime of the soil taking into account the incoming long-wave radiation. 2005. № 1 (35). P. 74-77.

7. Boyarskaya A.V. Numerical modeling of thermophysical parameters of the thermal regime of soils // Applied mathematics and fundamental informatics. 2014. No. 1. P. 135-139.

8. Yashin V.M., Glazunova I.V. Substantiation of plant requirements for the regulation of the water regime of soils and its control. 2022. № 5. P. 15-21. – DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-15-21.

9. Mikhajylov F.D., Shein E.V. Boundary conditions in modeling heat transfer in the soil. 2014. № 4. P. 1-6.

10. Rysbajuly B., Karashbaeva Zh.O. Moisture and thermophysical characteristics of the equation of heat and mass transfer in the soil // Bulletin of KazNPU named after Abai. Series: Physical and Mathematical Sciences. 2021. № 4 (76). P. 51-58. – DOI: 10.51889/2021-4.1728-7901.07.

11. Mikhailov Yu.A., Glazunov Yu.T. Variational methods in the theory of nonlinear heat and mass transfer. – Riga: Zinatne. 1985. 190 p.

12. Pavlov M.V. Investigation of heat and mass transfer processes in the soil layer on the example of milling peat with infrared-radiant heating: textbook / Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinitsyn A.A. et al. Vologda: VoGU. 2015. 192 p.

13. Lykov A.V. Theory of drying. Moscow: Energiya, 1968. 472 p.

14. Kurtener D.A., Uskov I.B. Climatic factors and thermal regime in open protected ground. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 232 p.

15. Antonov V.Ya., Malkov L.M., Gamayunov N.I. Technology of field drying of peat. M.: Nedra. 1981. 239 p.

16. Kovda V.A. Fundamentals of the doctrine of soils. General theory of the soil-forming process. In 2 vols. M.: Nauka, 1973. T. 1. 456 p.

17. Lykov A.V. Theory of thermal conductivity: textbook for universities. – M.: Vysshaya shkola. 1967. 600 p.

Criteria of authorship

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.

The authors declare that there are no conflicts of interest.

The article was submitted to the editorial office 16.03.2023

Approved after peer review 16.05.2023

Accepted for publication 16.05.2023