

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.Н. Брюховецкий¹, А.В. Скрыпников¹, Д.Г. Козлов^{2✉},
П.В. Романов¹, П.А. Бойков¹, М.Н. Казачек³

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Россия, 394036, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

dimvsau@mail.ru

Представлен анализ расчетных схем исследования тепловлажностных свойств грунтов лесовозных автомобильных дорог. Показаны их достоинства и недостатки. Предложен рациональный метод определения тепловлажностных свойств данных грунтов. Выявлены все факторы учитываемые при их анализе. Проведено математическое моделирование и определена целевая функция, являющаяся основной частью математической модели со всеми элементами и связями. С помощью математической модели установлены важнейшие тепловлажностные характеристики, позволяющие получить необходимые значения коэффициентов системы, по которым можно рассчитать поля влажности и температуры для технологического или эксплуатационного тепломассообмена при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Разработана структурная схема исследования тепловлажностных свойств, указанных грунтов для моделирования тепломассообмена.

Ключевые слова: свойства грунтов, тепловлажностные свойства грунта, тепловой поток, температуропроводность грунтов, лесные автомобильные дороги

Ссылка для цитирования: Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В., Козлов Д.Г., Романов П.В., Бойков П.А., Казачек М.Н. Структурная схема исследования тепловлажностных свойств грунтов лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 126–138.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-126-138

Основным элементом лесовозной автомобильной дороги служит земляное полотно. В зависимости от показателей его устойчивости, прочности и долговечности зависит работоспособность дорожных одежд и всей конструкции дороги вместе с дорожным покрытием.

Воздействие на дорожное покрытие со стороны нижележащих почвенных слоев, вызываемое нарушениями их водно-теплового режима, приводит к разрушению всей дорожной одежды. Для повышения ее долговечности и прочности важно составить прогноз влажности грунта в основании земляного полотна [1–4].

Применение разработанных методов определения тепловлажностных свойств (ТВС) грунтов в полевых условиях довольно затруднительно, поскольку сопряжено со сложными и трудоемкими исследованиями и значительными погрешностями измерений [5]. Для экспериментального определения ТВС грунтов на образцах широко используется арсенал физических преобразователей тепловых и влажностных процессов в электрические многопараметрические сигналы, поэтому большой интерес представляет исследо-

вание ТВС грунтов земляного полотна на образцах в лабораторных условиях [6–10].

Цель работы

Цель работы — разработка математического обоснования и структурной схемы исследования ТВС грунтов лесовозных автомобильных дорог для определения важнейших тепловых и влажностных характеристик, влияющих на технологический или эксплуатационный тепломассообмен при строительстве лесовозных автомобильных дорог.

Методика исследования

На основе анализа системы тепломассообменных процессов в грунтах земляного полотна [11–13] математическую модель можно представить следующим образом

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \epsilon \frac{\partial W}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + a_1 \epsilon_1 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где t — температура, К;

τ — время, с;

a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

z — переменная координата по глубине, м ;

ϵ — коэффициент теплообмена за счет фазовых превращений влаги, К ;

W — влажность, доли единицы;

a_1 — коэффициент учета влагопроводности;

ϵ_1 — термоградиентный коэффициент, $1/\text{К}$.

Коэффициент a_1 можно представить в виде

$$a_1 = \frac{a_{\text{ж}}}{1 - \epsilon}, \quad (3)$$

где $a_{\text{ж}}$ — влажностный коэффициент ТМО;

ϵ — критерий фазового превращения при конденсации водяного пара в жидкую фазу.

Термоградиентный коэффициент b_1 можно записать в виде

$$b_1 = \frac{\delta W}{\delta t}. \quad (4)$$

Коэффициент теплообмена за счет фазовых превращений для талых грунтов выражается следующим образом

$$b = \frac{\epsilon \rho_n}{c}, \quad (5)$$

где ρ_n — скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$;

c — удельная теплоемкость талого грунта, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Уравнения (1) и (2) описывают законы миграции тепла и влаги в земляном полотне дороги. В них входят коэффициенты a , a_1 , b , b_1 , характеризующие теплообменные процессы.

Эти свойства грунтов можно определить при ненарушенной структуре. Как показывает анализ литературных источников, проведение исследований тепловлажностных свойств грунтов в полевых условиях сопряжено с выполнением трудоемких процессов. Применяемые в исследованиях ТВС экспресс-методы дают значительные погрешности при измерениях. Наиболее рациональным в этом случае, является экспериментальное определение ТВС грунтов на образцах, которое в свою очередь позволяет широко использовать физические преобразования тепловых и влажностных процессов в электрические многопараметрические сигналы. Поэтому наибольший интерес в настоящее время представляет исследование ТВС грунтов полотна на образцах в лабораторных условиях [14–18, 22–25].

При исследовании ТВС на образцах на основе выражений (1) и (2) необходимо обосновать условия однозначности, позволяющие в наибольшей мере моделировать теплообмен в грунтах. Для этой цели необходимо обосновать форму и свойства образцов, а также начальные и краевые условия теплообмена.

В теории и практике исследований ТВС грунтов обычно применяют образцы в виде пластины и стержней. Для таких форм образцов известно наибольшее количество расчетных схем и аналитических решений. Особенно это имеет место в теории теплообмена. Выбор формы пластины и стержня зависит прежде всего от гарантированной направленности тепло- и влагодиффузии в исследуемом теле, т.е. создаваемой направленности градиентов [5, 9, 19–21].

Если вдоль образца закон распределения тепла и влаги является однородным, линейным, то образец рекомендуется брать в виде пластины, что сокращает время испытания и повышает достоверность полученных результатов. Если же вдоль образца устанавливается нелинейное поле, то целесообразно применять образец в виде стержня.

При исследованиях образцов методом математического моделирования с применением выражений (1) и (2) следует задать ТВС грунтов с линейными или нелинейными законами их изменения вдоль образца. В практике исследования капиллярно-пористых тел образцы используют, как правило, из однородных материалов.

Начальные и краевые условия при исследованиях принимаются различными, в зависимости от расчетных схем и условий стабилизации температуры, тепловых потоков и влажности на краях образцов.

Рассмотрим следующие расчетные схемы.

Схема 1. Комплексный теплообмен в образце (уравнения (1) и (2)). Эта схема является наиболее общей. Влажность образцов находится в пределах $W_{\text{мг}} < W < W_{\text{пв}}$, температура $t_{\text{л}} < t < t_{\text{б}}$, где $W_{\text{мг}}$ — мгновенное значение влажности грунта в точке отбора пробы; $W_{\text{пв}}$ — поверхностная влажность грунта; $t_{\text{л}}$ — линейная температура грунта; $t_{\text{б}}$ — максимальная бытовая температура грунта земляного полотна. Проводится одновременный анализ диффузии тепла и миграции влаги, а также их общего влияния друг на друга. Наиболее полно определяется реальный влажностно-температурный режим (ВТР) земляного полотна. Однако исследование ТВС по схеме 1 вызывает большие затруднения.

Схема 1 широко используется при дорожном строительстве в процессе возведения полотна и в различных условиях его эксплуатации. Она применима к анализу влажностно-температурного режима полотна в зимние и летние периоды, при анализе свойств в процессе перемешивания различных грунтов с вяжущими, при уплотнении промерзающих грунтов, при транспортировании грунтов, а также в других случаях.

Схема 2. Теплообмен без массообмена. Применяется при исследовании диффузии тепла с малым влагосодержанием образцов ($W < W_{\text{мг}}$),

при изучении ТВС на пластинах, на образцах из песчаных и обломочных грунтов, а также при изучении свойств слоев одежд из щебня, гравия и других материалов.

Математическая модель для второй расчетной схемы имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (6)$$

В дорожном строительстве схема 2 применяется при расчетах термообработки грунтов, при замораживании грунтов в процессе проходки водонасыщенных пластов, при перемешивании грунтов малой влажности с вяжущими грунтами.

Схема 3. Массообмен без теплообмена. Предназначена для случаев изучения ТВС при наличии значительных влажностных градиентов при изотермическом влагообмене, при контактировании почвенных слоев различной влажности, а также при быстром и интенсивном их увлажнении.

Математическая модель схемы 3 отмечается коэффициентом пропорциональности m_1 . На противоположном торце образца температура возрастает, но с меньшей интенсивностью — m_2 .

На «горячем» торце вследствие испарения влажность уменьшается с темпом m_3 , а на «холодном» из-за термодиффузии увеличивается с темпом m_4 .

Процесс, обусловленный тепловлагообменом на «горячем» и «холодном» торцах, описывается следующими краевыми условиями:

$$t(z, 0) = t_n; \quad 0 \leq z \leq l; \quad (7)$$

$$t(0, \tau) = t_n + m_1 \tau; \quad m_2 < m_1; \quad (8)$$

$$t(l, \tau) = t_n + m_2 \tau; \quad 0 \leq \tau \leq 3,6 \cdot 10^3 \text{c}; \quad (9)$$

$$W(z, 0) = W_n; \quad m_3 > m_4; \quad (10)$$

$$W(0, \tau) = W_n - m_3 \tau; \quad (11)$$

$$W(l, \tau) = W_n + m_4 \tau. \quad (12)$$

Уравнения (1) и (2) решали при краевых условиях (10). Подставив второе уравнение системы (10) в первое, получаем

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + a_1 b_1 b \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + b a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = a_1 b_1 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}. \quad (14)$$

Примем новые функции

$$T = t - t_n; \quad W_1 = W - W_n. \quad (15)$$

Вектор переменных и матрица коэффициентов системы уравнений будут иметь следующий вид

$$X = \begin{pmatrix} T \\ W_1 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} a + a_1 b_1 b & a_1 b_1 \\ a_1 b_1 & a_1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Запишем уравнение (13) в матричном виде

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = A \frac{\partial^2 X}{\partial z^2}; \quad (17)$$

$$X(z, 0) = 0;$$

$$X(0, \tau) = \begin{pmatrix} m_1 \tau \\ -m_3 \tau \end{pmatrix}; \quad X(l, \tau) = \begin{pmatrix} m_2 \tau \\ m_4 \tau \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Приведем матрицу A к диагональной матрице S

$$S = BAB^{-1} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 + \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 - 4a_1 a} \right] & \\ 0 & 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 - \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 - 4a_1 a} \right] \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где λ_1 и λ_2 — собственные значения матрицы A .

$$\lambda_1 = 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 + \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 + 4a_1 a} \right] > 0. \quad (20)$$

$$\lambda_2 = 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 - \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 + 4a_1 a} \right] > 0. \quad (21)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_1 - a}{\sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} & \frac{\lambda_2 - a}{\sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} \\ \frac{a_1 b}{\sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} & \frac{a_1 b}{\sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(a_1 - \lambda_2) \sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{(\lambda_1 - \lambda_2) a_1 b} \\ \frac{\sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(\lambda_1 - a_1) \sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{(\lambda_1 - \lambda_2) a_1 b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b'_{11} & b'_{12} \\ b'_{21} & b'_{22} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Введем обозначения:

$$d_1 = \sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}; \quad (24)$$

$$d_2 = \sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}. \quad (25)$$

Тогда матрицы B и B^{-1} можно записать

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_1 - a_1}{d_1} & \frac{\lambda_2 - a_1}{d_2} \\ \frac{a_1 b_1}{d_1} & \frac{a_1 b}{d_2} \end{pmatrix}; \quad (26)$$

$$B^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{d_1}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(a_1 - \lambda_2)d_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)a_1 b} \\ \frac{d_2}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(\lambda_1 - a)d_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)a_1 b} \end{vmatrix}. \quad (27)$$

Введем новый вектор $\gamma = BX$.

Тогда уравнение (18) примет вид

$$B = \frac{\partial X}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (28)$$

или

$$B = \frac{\partial X}{\partial \tau} = BAB^{-1}B \frac{\partial^2 X}{\partial z^2}; \quad (29)$$

при краевых условиях:

$$\gamma(z, 0) = 0; \quad (30)$$

$$\gamma(0, \tau) = B \begin{vmatrix} m_1 \tau \\ -m_3 \tau \end{vmatrix}; \quad (31)$$

$$\gamma(l, \tau) = B \begin{vmatrix} m_2 \tau \\ -m_4 \tau \end{vmatrix}. \quad (32)$$

Решение уравнения (29) при краевых условиях (31) имеет вид

$$\gamma(z, \tau) = \frac{2S\pi}{l^2} \sum_1^{\infty} n \exp\left[\frac{Sn^2 \pi^2 \tau}{l^2}\right] \sin \frac{\pi n z}{l} \times \int_0^{\tau} \exp\left[-\frac{Sn^2 \pi^2 \eta}{l^2}\right] [\gamma(0, \tau) - (-1)^n \gamma(l, \tau)] d\eta. \quad (33)$$

Отсюда

$$\gamma(z, \tau) = \frac{2}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n z}{l}}{n} \times \left[\frac{\tau}{S} - \frac{l^2}{S^2 \pi^2 n^2} - \frac{l^2 \exp(-S\pi^2 n^2 (l^2 x \tau))}{S^2 \pi^2 n^2} \right] \cdot B \cdot M, \quad (34)$$

где

$$M = \begin{vmatrix} m_1 - (-1)^n m_2 \\ -m_3 - (-1)^n m_4 \end{vmatrix}. \quad (35)$$

Найдем вектор $X = B^{-1}\gamma$ и составляющие вектора X : температуру t (K) и влажность W (%).

Окончательно выражение для поля температуры в образце с учетом влагообмена примет вид

$$t(z, \tau) = t_{\text{н}} + \frac{2}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n z}{l}}{n(\lambda_1 - \lambda_2)} \times \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_1} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_1 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times$$

$$\times [(\lambda_1 - a_1)(m_1 - (-1)^n m_4)] + \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_2} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_2 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times \left[(a_1 - \lambda_2)(m_1 - (-1)^n m_2) - \frac{(a_1 - \lambda_2)d_1}{d_2} (m_3 + (-1)^n m_4) \right]. \quad (36)$$

Окончательно выражение для поля влажности в образце примет вид

$$W(z, \tau) = W_{\text{н}} + \frac{2}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n z}{l}}{n(\lambda_1 - \lambda_2)} \times \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_1} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_1 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times \left[\frac{d_2(\lambda_1 - a_1)}{d_1(\lambda_1 - \lambda_2)} (m_1 - (-1)^n m_2) - (\lambda_2 - a_1)(m_3 + (-1)^n m_4) \right] + \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_1} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_2 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times \left[\frac{(\lambda_1 - a)d_2}{d_1} (m_1 - (-1)^n m_2) + (\lambda_1 - a)(m_3 + (-1)^n m_4) \right]. \quad (37)$$

Полученные аналитические выражения удовлетворяют краевым условиям (10). Справедливость их решения подтверждается также анализом размерностей.

Рассмотрим иной вариант решения задачи для схемы 1. При исследовании ТВС на стержнях, термоизолированных с «холодного» конца, схема 1 можно представить в виде полуограниченного стержня.

Рассмотрим решение уравнений (1) и (2) без учета термовлагопроводности (т. е. без второго члена правой части выражения (2)). Такая схема применима при определении ТВС образцов с повышенной начальной влажностью ($W \geq 0,65 W_{\tau}$).

В таком случае краевые условия можно записать в виде

$$t(z, 0) = t_{\text{н}}; t(0, \tau) = t_{\text{н}} + m_1 \tau; \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0; \quad (38)$$

$$W(z, 0) = W_{\text{н}}; W(0, \tau) = W_{\text{н}} - m_2 \tau; \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0. \quad (39)$$

Введем переменную

$$V(z, \tau) = W(z, \tau) - (W_{\text{н}} - m_2 \tau). \quad (40)$$

Подставляя данные (39) и (40) в выражение (2), получаем неоднородное уравнение с новыми краевыми условиями

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + m_2; \quad (41)$$

$$V(z, 0) = 0; V(0, \tau) = 0; \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad (42)$$

где $a_1 = \frac{a_{ж}}{1-\varepsilon}$ — коэффициент влагопроводности двухфазной влаги;

$$V(z, \tau) = \sum_1^{\infty} V_n(\tau) \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (43)$$

Решение выражения (43) удовлетворяет граничным условиям при любом значении $V_n(\tau)$. Подставляя выражение (43) в уравнение (41), получаем

$$\sum_0^{\infty} V_n''(\tau) + a_1 \left[\frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l} = m_2. \quad (44)$$

Для выполнения условия (44) необходимо, чтобы

$$V_n''(\tau) + a_1 \left[\frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 V_n(\tau) = \frac{2m_2}{l} \int_0^l \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l} dz = \quad (45)$$

$$= -\frac{2m_2}{l} \cos \frac{(2n+1)\pi z}{2l} \Big|_0^l = \frac{4m_2}{(2n+1)\pi};$$

$$V_n'(\tau) \Big|_{\tau=0} = 0. \quad (46)$$

Решением системы уравнений (45) и (46) будет следующее:

$$V_n(\tau) = \frac{4m_2}{(2n+1)\pi} \int_0^{\tau} \exp \left\{ \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right] (\tau - \tau') \right\} dt = \quad (47)$$

$$= \frac{16m_2 l^2}{(2n+1)^3 \pi^3 a} \left\{ 1 - \exp \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2 \tau}{4l^2} \right] \right\}.$$

Из выражения (39) имеем

$$V_n(\tau, z) = \frac{16m_2 l^2}{a_1 \pi^3} \times \sum_0^{\infty} \frac{1 - \exp \left[-\frac{a_1 \tau (2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right]}{(2n+1)^3} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (48)$$

Подставив уравнение (48) в выражение (39), получим выражение для расчета поля важности

$$W(z, \tau) = W_{н} - m_2 \tau + \frac{16m_2 l^2}{a_1 \pi^3} \times$$

$$\times \sum_0^{\infty} \frac{1 - \exp \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2 \tau}{4l^2} \right]}{(2n+1)^3} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (49)$$

Скорость изменения влажности принимает вид

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -m_2 + \frac{4m_2}{\pi} \times \sum_0^{\infty} \frac{\exp \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau \right]}{(2n+1)} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (50)$$

Подставляя уравнение (50) в выражение (1) и используя краевые условия (15), получаем

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + b [f(z, \tau) - m_2]; \quad (51)$$

$$t(z, 0) = t_{н}; t(0, \tau) = t_{н} + m_1 \tau; \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad (52)$$

где

$$f(z, \tau) = \frac{4m_2}{\pi} \times \sum_0^{\infty} \frac{\exp \left[-\frac{a_1 \tau (2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right]}{2n+1} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (53)$$

Для решения уравнения (52) введем переменную

$$V(z_1, \tau) = t(z, \tau) - (\tau_{н} + m_1 \tau). \quad (54)$$

Тогда получаем

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = [f(z, \tau) - m_2] b - m_1; \quad (55)$$

$$V(z, 0) = 0; V(0, \tau) = 0; \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0. \quad (56)$$

Решение задачи (55), (56) будем искать в виде

$$V = V_1 + V_2, \quad (57)$$

где V_1 — решение (55), (56) при $m_1 = m_2 = 0$, а V_2 при $f(z, \tau) = 0$.

По аналогии с решением системы (17), (18) имеем

$$V_2(z, \tau) = -\frac{16(m_2b + m_1)l^3}{a\pi^3} \times \sum_0^{\infty} \frac{1 - \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right]}{(2n+1)^3} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (58)$$

$$V_1(z, \tau) = \sum_0^{\infty} V_{n1}(\tau) \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (59)$$

Подставляя полученное выражение (59) в уравнение (55) при $m_1 = m_2 = 0$, получаем

$$\sum_0^{\infty} V_{n1}(\tau) + a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} V_{n1}(\tau) \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l} = \sum_0^{\infty} \frac{4m_2b}{(2n+1)\pi} \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (60)$$

Это равенство возможно лишь при условии

$$V_{n1}(\tau) + a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} V_{n1}(\tau) = \frac{4m_2b}{(2n+1)\pi} \cdot \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right]. \quad (61)$$

Из начального условия (46) следует, что

$$V_{n1}(\tau)|_{\tau=0} = 0. \quad (62)$$

Решением системы (61), (62) является функция

$$V_{n1}(\tau) = \frac{4m_2b}{(2n+1)\pi} \cdot \int_0^{\tau} \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau'\right] \times \exp\left[-a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} (\tau - \tau')\right] d\tau' = -\frac{16m_2bl^2}{(a_1 - a)(2n+1)^3 \pi^3} \times \left\{ \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] - \exp\left[-a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \right\}. \quad (63)$$

Подставляя уравнение (63) в выражение (59), имеем

$$V_1(z, \tau) = -\frac{16m_2bl^2}{(a_1 - a)\pi^3} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \times \left\{ \exp\left[-\frac{a_1(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] - \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \right\} \times \sin \int_0^{\tau} \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (64)$$

Используя уравнения (55), (57), окончательно получаем из расчета тепломассообмена в образце

$$t(z, \tau) = t_n + m_1\tau - \frac{16l^2}{a\pi^3} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \left\{ \frac{m_2b}{a_1 - a} \times \exp\left[-\frac{a_1(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] + \left(-\frac{m_2b}{a_1 - a} - \frac{m_2b + m_1}{a} \right) \times \left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau \right] + \frac{m_2b + m_1}{a} \right\} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}, \quad (65)$$

где $b = \frac{\varepsilon \rho_n}{c}$.

Рассмотрим решение уравнений (1), (2) без учета второго члена правой части уравнения (1) при краевых условиях (15).

Опуская промежуточные решения, получаем выражения для расчета поля температуры

$$t(z, \tau) = t_n + m_1\tau - \frac{16l^2}{a\pi^3} \times \sum_1^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \right\} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (66)$$

$$W(z, \tau) = W_n - m_2\tau + \frac{16l^2}{a\pi^3} \sum_1^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \times \left\{ \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \times \frac{a_1 m_1 b}{a - a_1} - \left(m_2 + \frac{m_1 b_1 a_1}{a - a_1} \right) \times \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] + m_1 b_1 + m_2 \right\} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (67)$$

Рассмотрим решения задачи для схемы 2. Схема теплообмена без массообмена.

Решим уравнение

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (68)$$

при следующих краевых условиях:

$$\begin{cases} t(z, 0) = t_n, & 0 \leq z \leq l, \\ t(0, \tau) = t_n + m_1 \tau, & m_2 < m_1, \\ t(l, \tau) = t_n + m_2 \tau, & 0 \leq \tau \leq 3,6 \cdot 10^3 \text{ с}. \end{cases} \quad (69)$$

Введем новую функцию $T(z, \tau) = t(z, \tau) - t_n$.

Тогда имеем следующее уравнение с новыми краевыми условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (70)$$

$$\begin{cases} T(z, 0) = 0 \\ T(0, \tau) = m_1 \tau \\ T(l, \tau) = m_2 \tau \end{cases} \quad (71)$$

Решение уравнения (70) найдем в виде

$$\begin{aligned} T &= \frac{2a\pi}{l^2} \sum_1^\infty n \exp\left[-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right] \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \cdot \int_0^z \exp\frac{an^2\pi^2}{l^2}\lambda \times \\ &\quad \times [m_1\lambda - (-1)^n m_2] d\lambda = \\ &= \frac{2a\pi}{l^2} \sum_1^\infty \exp\left[-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right] \cdot \int_0^z \exp\frac{an^2\pi^2}{l^2}\lambda d\lambda = \\ &= \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_1^\infty \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \cdot \left[\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]. \end{aligned} \quad (72)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} t(z, \tau) &= t_n + \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_1^\infty \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \times \\ &\quad \times \left[\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]. \end{aligned} \quad (73)$$

Поскольку ряд, стоящий в правой части равенства (70) удовлетворяет условиям теоремы Лейбница о знакопеременных рядах, остаток ряда не превосходит по абсолютной величине первый из отброшенных членов, т. е.

$$\begin{aligned} \left| R_n\left(\frac{l}{2}, \tau\right) \right| &= \frac{2l^2}{a\pi^3} \times \\ &\quad \times \int_{k=n+1}^{+\infty} \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \times \\ &\quad \times \left[\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right] \leq \\ &\leq \frac{2l^2}{a\pi^3} \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \times \\ &\quad \times \left[\frac{a(n+1)^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{a(n+1)^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]. \end{aligned} \quad (74)$$

Оценим отношение суммы всех показателей (74) имеем

$$\begin{aligned} &\frac{R_n\left(\frac{l}{2}, \tau\right)}{\frac{2l^2}{a\pi^3} (m_1 + m_2) \left[\frac{a\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2\tau}{l^2}\right)\right]} \leq \\ &\leq \frac{1}{27} \frac{\left[\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau\right)\right]}{\left[\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau\right)\right] - \varepsilon}, \end{aligned} \quad (75)$$

так как

$$\begin{aligned} &\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - \frac{1}{9} + \exp\left(-\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau\right) < \\ &< \frac{\pi^2 a\tau}{l} - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2\tau}{l^2}\right), \end{aligned} \quad (76)$$

$$\begin{aligned} &9 \frac{\left[\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - \frac{1}{9} + \exp\left(-\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau\right)\right]}{\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2\tau}{l^2}\right)} < 9. \end{aligned} \quad (77)$$

Таким образом, $\varepsilon = \frac{1}{3}$ и, следовательно,

$$\begin{aligned} &\frac{R_1\left(\frac{l}{2}, \tau\right)}{\frac{2l^2}{A\pi^3} (m_1 + m_2) \left[\frac{a\pi^2}{l^2}\tau - 1 - \exp\left(-\frac{a\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]} \cdot \end{aligned} \quad (78)$$

Для оценки погрешности, допускаемой при замене суммы ряда (72) его частичной суммой в других точках $x \neq l/2$, воспользуемся признаком Абеля. При приближении к концам интервала $0 \leq x \leq l$ оценка остатка ряда по признаку Абеля становится непригодной.

Для равномерной оценки остатка ряда на всем интервале $0 \leq x \leq l$ применим следующий способ:

$$\begin{aligned} R_n(z, \tau) &= \left| \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_{k=n+1}^\infty \frac{m_1 - (-1)^k m_2}{k^3} \left[\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right] \right| \times \\ &\times \sin \frac{\pi k z}{l} \leq \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_{k=n+1}^\infty \frac{m_1 - (-1)^k m_2}{k^3} \left[\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right] < \\ &< \frac{2l^2}{a\pi^3} \int_{A_n}^{+\infty} \frac{m_1 + m_2}{x^3} \left[\frac{a\pi^2}{l^2}\tau x^2 - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2}{l^2}\tau x^2\right)\right] dx = \\ &= \frac{2l^2}{a\pi} (m_1 + m_2) \int_{A_n}^{+\infty} \frac{1}{\xi} \left[\xi^2 - 1 + \exp(-\xi^2)\right] d\xi = \\ &= \frac{2l^2}{a\pi} (m_1 + m_2) \int_{A_n}^{+\infty} \left[\xi - \frac{1}{\xi} + \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi}\right] d\xi, \end{aligned} \quad (79)$$

где

$$\xi = \frac{x\pi}{l} \sqrt{a\tau}; \quad (80)$$

$$A_n = \frac{\pi n}{l} \sqrt{a\tau}. \quad (81)$$

После интегрирования получаем

$$\int_{A_n}^{+\infty} \left[\xi - \frac{1}{\xi} + \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi} \right] d\xi = \left(\xi^2 - \ln \xi \Big|_{A_n}^{+\infty} + \int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi} d\xi; \quad (82)$$

$$\int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi} d\xi = \frac{1}{2A_n^2} \exp(-A_n^2) + \int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi^3} d\xi. \quad (83)$$

Однако

$$\int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi^3} d\xi < \exp(-A_n^2) \int_{A_n}^{+\infty} \frac{d\xi}{\xi^3} = \frac{\exp(-A_n^2)}{2A_n^2}. \quad (84)$$

Таким образом, выражение для равномерной оценки остатка ряда будет иметь следующий вид

$$|R_n(x, \tau)| < \frac{2l^2}{a\pi} (m_1 + m_2) \frac{\exp(-A_n^2)}{2A_n^2}, \quad (85)$$

где

$$A_n = \frac{\pi n}{l} \sqrt{a\tau}. \quad (86)$$

Выражение (86) дает возможность с заданной точностью определять значения температуры t по формуле (73).

Решение задачи для расчетной схемы 3 аналогично решению для схемы 2.

Окончательное выражение для поля влажности в образце принимает вид

$$W(z, \tau) = W_n + \frac{2l^2}{a_1\pi^3} \sum_1^{\infty} \frac{m_3 - (-1)^n m_4}{n^3} \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \times \left[\frac{an^2\pi^2}{l^2} \tau - 1 + \exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{l^2} \tau\right) \right]. \quad (87)$$

Изучение ТВС грунтов, как это следует из приведенных ранее разделов с достаточной достоверностью можно проводить на образцах с нарушенной структурой. Коэффициенты уравнений (1) и (2), характеризующие тепломассообмен в грунтах, можно условно подразделить на группы: тепловые — a, b , влажностные — $a_1(a_{ж}, a_n)$ и термоградиентные — b_1 .

На рисунке представлена структурная схема основных коэффициентов тепломассообмена в грунтах.

Значение коэффициента температуропроводности a является функцией многих переменных: $a = f(\lambda, c, W, \Phi_w, X, \Gamma)$, т. е. зависит от теплопроводности λ , удельной теплоемкости c , влажности, фазового состава влаги Φ_w , химического X и гранулометрического Γ составов. Изучение влияния перечисленных физических и тепловых характеристик на коэффициент температуропроводности грунтов является сложной теоретической и практической задачей. Важно учитывать только те факты, которые в значительной степени могут их исказить. Как было отмечено в работах [17, 21], на значение коэффициента теплопроводности и температуропроводности оказывают существенное влияние плотность, влажность и тип грунта. Практический интерес представляет исследование влияния перечисленных факторов на величину тепло- и температуропроводности различных грунтов. При построении зависимостей $\lambda = f(W, \delta)$, $a = f(W, \delta)$ предпочтительнее плотность δ и влажность W представить в безразмерном виде, т. е. $\lambda = f(K_y, W_{от})$, $a = f(K_y, W_{от})$.

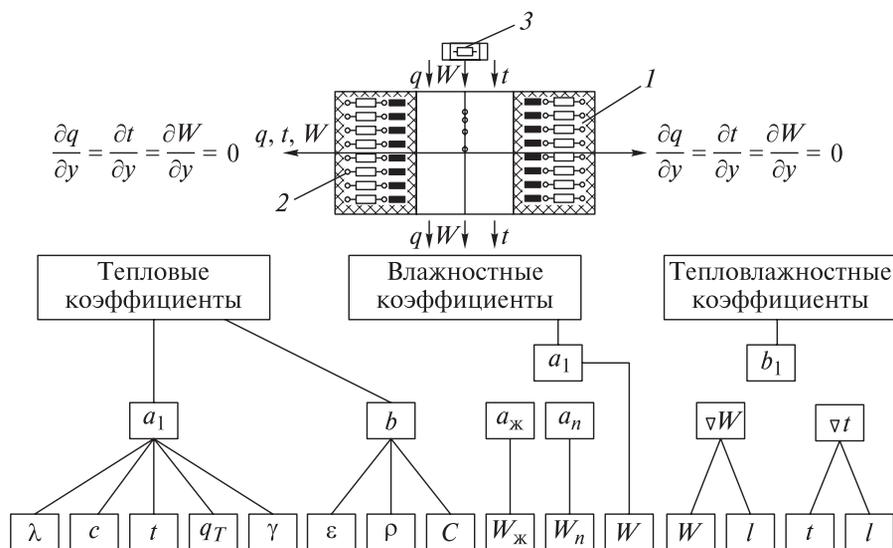
Для экспериментального определения коэффициента теплопроводности применяют стационарные и нестационарные методы. Стационарные методы, основанные на законе Фурье для стационарного теплового потока, точнее, чем нестационарные, поскольку в стационарном режиме можно с более высокой точностью выполнить заданные граничные условия, а проверку воспроизводимости прибора осуществить по эталонным материалам с известными теплофизическими характеристиками.

Коэффициенты температуропроводности определяют, как правило, нестационарными методами.

Для получения достоверных сведений о теплофизических характеристиках грунтов и материалов наиболее приемлемыми являются комплексные методы. С помощью таких методов по одному эксперименту и на одном образце можно получить все основные теплофизические характеристики исследуемых материалов, т. е. λ, c, a . Образец грунта 1 (см. рисунок) помещается в специальную адиабатическую оболочку 2 и облучается инфракрасным источником тепла 3, т. е. в образце выполняются условия

$$\frac{dt}{dy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial z} \neq 0; \quad \frac{\partial W}{\partial z} \neq 0. \quad (88)$$

Влияние коэффициента, определяющего теплообмен за счет фазовых превращений влаги, в тепловых процессах в грунтах значительно, так как при фазовом переходе выделяется (поглощается) до $2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг воды. Испарение (конденсация) 1 кг воды, находящейся в порах грунта, существенно изменяет его теплосодержание.



Структурная схема связи основных коэффициентов тепломассообмена в грунтах: 1 — исследуемый образец; 2 — адиабатическая оболочка; 3 — инфракрасный источник тепла
 Structural connection scheme of the main coefficients of heat and mass transfer in soils: 1 — studied sample; 2 — adiabatic shell; 3 — infrared heat source

Для определения коэффициента b необходимо знать значения критерия фазового превращения ϵ при конденсации водяного пара в жидкость, значения скрытой теплоты парообразования ρ_n и удельной теплоемкости c исследуемого грунта.

Коэффициенты ϵ и ρ_n с достаточной полнотой изучены в теплофизике. Удельную теплоемкость грунтов и материалов можно определить в нестационарном тепловом режиме, измерив во времени удельные тепловые потоки на входе и выходе из образца и среднее приращение температуры.

Значения удельных тепловых потоков q в настоящей работе предлагается измерять с помощью специальных тепловых преобразователей — батарейных теплотметрических датчиков (ТД). Особенностью таких измерений является то, что величина сигнала датчика пропорциональна пронизывающему образец тепловому потоку и не зависит от температуры. Влажностный коэффициент a_1 системы (2), характеризующий влагопроводность двухфазной влаги, можно записать в виде

$$a_1 = a_n + a_{ж}. \tag{89}$$

Для определения коэффициентов влагопроводности жидкой фазы $a_{ж}$ необходимо знать величину потока жидкообразной влаги $q_{ж}$ и влажность образца W . Определение этих характеристик сопряжено с измерением вдоль оси исследуемого образца изменения влажности во времени. Поэтому информацию о влажности следует получать многократно в ходе всего опыта, не нарушая структуру и массу образца. Для получения информации о влажности пригодны физические методы или метод непрерывного взвешивания

образца, подвешенного в контейнере одним концом к чашке аналитических весов.

Определив количество жидкообразной влаги в образце и парообразную влагу W_n можно установить расчетом.

Получив значение W_n вдоль исследуемого образца и зная градиенты температуры, можно рассчитать потоки водяного пара q_n .

Линейные размеры исследуемых образцов l задаются при их формовке. Увеличением размеров образца в результате нагрева можно пренебречь, так как эта величина не вносит существенных искажений в измерение ТВС грунтов. Точки измерения влажности вдоль образца (l, l_1, l_2, l_3, \dots) при комплексном определении ТВС определяются при фиксированном размещении датчиком влажности на стенке контейнера.

Выводы

Экспериментальное определение важнейших тепловых (λ, a, c, q, t) и влажностных ($W, W_n, W_{ж}$) характеристик позволит получить значения коэффициентов a, a_1, b, b_1 в уравнениях (1) и (2), что даст возможность рассчитать поля влажности и температуры для технологического или эксплуатационного тепломассообмена при строительстве лесовозных автомобильных дорог.

Список литературы

- [1] Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог М.: Транспорт, 1983. 207 с.
- [2] Чернышова Е.В. Методы формирования цифровой модели местности при трассировании лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 3(35). С. 143–148.

- [3] Тихомиров П.В., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Бондарев А.Б., Казачек М.Н., Брюховецкий А.Н. Анализ современных методов изыскания лесовозных автомобильных дорог // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2023. № 242. С. 179–188.
- [4] Mogutnov R.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zavrazhnikov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the Main Parameter of the System // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology: proc. of the Int. Symp. «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), Grozny, 12–13 June 2019. V. 1. Grozny: Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: 10.2991/isees-19.2019.165
- [5] Berestnev O, Soliterman Y, Goman A Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines — One of the Key Problems of Engineering Science // Int. Symp. on History of Machines and Mechanisms Proceedings, 2000, pp. 325–332.
- [6] Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. 05.21.01 Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Архангельск, 2017. 406 с.
- [7] Бондарев А.Б., Козлов Д.Г. Обследование эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Международ. науч.-практ. конф. (Воронеж, 06–07 июня 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 196–200.
- [8] Бойков П.А., Козлов Д.Г. Целесообразность мероприятий по повышению технико-эксплуатационного состояния лесовозных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Международ. науч.-практ. конф. (Воронеж, 06–07 июня 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 190–195.
- [9] Боровлев А.О., Козлов Д.Г., Тихомиров П.В., Логойда В.С. Методология проектирования лесовозных автомобильных дорог // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: Материалы Нац. науч.-практ. конф. (01 октября 2021 г., г. Воронеж). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2021. С. 168–175.
- [10] Козлов Д.Г., Никитин В.В., Скрыпников А.В., Брюховецкий А.Н., Сапелкин Р.С., Тихомиров П.В., Тверитнев О.Н., Денисенко В.В. Интеллектуальные системы проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог. Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2021. 206 с.
- [11] Константинов А.Р. Испарение в природе. Л.: ГИМИЗ, 1968. 59 с.
- [12] Мезенцев В.С. Расчеты водного баланса. Омск: ОмСХИ, 1976. 74 с.
- [13] Сиденко В.М. Стандартизация и контроль качества в дорожном строительстве. Киев: Высшая школа, 1985. 256 с.
- [14] Никитин В.В., Козлов Д.Г., Скрыпников А.А., Брюховецкий А.Н., Викулин И.А., Злобина Н.И., Сапелкин Р.С. Методический подход к расчёту удельных затрат при строительстве лесовозных дорог // Строительные и дорожные машины, 2021, № 12. С. 50–54.
- [15] Никитин В.В., Денисенко В.В., Скрыпников А.В., Брюховецкий А.Н., Тихомиров П.В., Козлов Д.Г., Сапелкин Р.С., Прокопец В.С. Методика разработки нормативов для проектирования лесотранспортных сетей // Строительные и дорожные машины, 2021. № 12. С. 45–49.
- [16] Прокопец В.С., Скрыпников А.А., Козлов Д.Г., Тихомиров П.В., Букреев В.Ю., Казачек М.Н. Методика проведения обследования эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины, 2022. № 2. С. 51–54.
- [17] Тимофеев В.А., Тихомиров П.В., Козлов Д.Г., Тверитнев О.Н., Скрыпников А.А., Боровлев Ю.А., Щербаков Е.Д., Казачек М.Н., Жук А.Ю. Исследование состояний подсистемы последовательного анализа лесовозных автомобильных дорог с прогнозированием объема контрольно-приемочных измерений на основе теории Марковских случайных процессов // Системы. Методы. Технологии, 2022. № 3(55). С. 146–151.
- [18] Козлов Д.Г. Анализ видов и назначений ведомственных дорог // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы Нац. науч.-практ. конф. (Воронеж, 19–21 апреля 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 336–342.
- [19] Козлов Д.Г. Технологические особенности автомобильных лесовозных дорог // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы Нац. науч.-практ. конф. (Воронеж, 19–21 апреля 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 343–349.
- [20] Бондарев А.Б., Козлов Д.Г. Обследование эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Международ. науч.-практ. конф. (Воронеж, 06–07 июня 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 196–200.
- [21] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Boltnev D.E., Borovlev A.O. Influence of natural and technogenic factors on the complexity of construction of timber highways // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 August, 2020). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012137.
- [22] Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural Models of Road Landscapes and Microlandscapes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 August, 2020). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012116.
- [23] Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Сочетания криволинейных участков плана и продольного профиля трассы лесовозных автомобильных дорог // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2021. № 235. С. 19–207.
- [24] Жук А.Ю., Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Болтнев Д.Е., Высоцкая И.А. Исследование математической модели рельефа местности при проектировании автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2(50). С. 88–93.
- [25] Popov V.N., Vasilenko V.N., Khvostov V.A., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Ivanov A.V., Belyaev A.N., Stukalo O.G. Security threats to personal data in the implementation of distance educational services using mobile technologies // J. of Theoretical and Applied Information Technology, 2021, v. 99, no. 15, pp. 3935–3946.

Сведения об авторах

Брюховецкий Андрей Николаевич — экстерн, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», bruhoveckiy@rambler.ru

Скрыпников Алексей Васильевич — д-р техн. наук, декан факультета «Управление и информатика в технологических системах», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», skrypnikovvsafe@mail.ru

Козлов Дмитрий Геннадиевич — канд. техн. наук, зам. декана по трудоустройству Агроинженерного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dimvsau@mail.ru

Романов Павел Олегович — экстерн, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Romanov_pa@yandex.ru

Бойков Павел Александрович — экстерн, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», pboy-kov23@mail.ru

Казачек Мария Николаевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», kazachekmaria@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023.

Одобрено после рецензирования 03.07.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

STRUCTURAL DIAGRAM OF TRUCK HAULROADS HYGROTHERMAL SOILS PROPERTIES

**A.N. Bryukhovetsky¹, A.V. Skrypnikov¹, D.G. Kozlov²,
P.V. Romanov¹, P.A. Bokov¹, M.N. Kazachek³**

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolution Av., 394036, Voronezh, Russia

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1, Michurina st., 394087, Voronezh, Russia

³Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

dimvsau@mail.ru

The analysis of the calculation schemes of the truck haulroads hygrothermal soils properties is presented, which showed its advantages and disadvantages, also a block diagram of the most rational method for determining the hygrothermal properties was proposed while mathematical modeling was carried out with the identification of all factors taken into account in the analysis of the haulroads soils. The objective function is defined, which is the main part of the mathematical model and includes all the elements and connections of the system for studying the elements of the haulroads soils properties. As a result of mathematical modeling, the most important hygrothermal characteristics were determined to obtain the coefficient values of the system, which makes it possible to calculate the field of humidity and temperature for technological or operational heat and mass transfer in the construction of haulroads. As a result of mathematical modeling, a structural diagram of the relationship of the main coefficients was obtained, which allows to simulate hygrothermal transfer in soils to the greatest extent, which in turn allows to substantiate the shape and properties of samples, as well as the initial and boundary conditions when determining the heat and moisture properties of the soil.

Keywords: soil properties, hygrothermal properties of soil, heat flow, thermal conductivity of soils, truck haulroads

Suggested citation: Bryukhovetskiy A.N., Skrypnikov A.V., Kozlov D.G., Romanov P.V., Boykov P.A., Kazachek M.N. *Strukturnaya skhema issledovaniya teplovlazhnostnykh svoystv gruntov lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Structural diagram of truck haulroads hygrothermal soils properties]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 126–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-126-138

References

- [1] Khomyak Ya.V. *Proektirovanie setey avtomobil'nykh dorog* [Design of highway networks]. Moscow: Transport, 1983, 207 p.
- [2] Chernyshova E.V. *Metody formirovaniya tsifrovoy modeli mestnosti pri trassirovani lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methods for the formation of a digital terrain model when tracing logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 3(35), pp. 143–148.
- [3] Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Bondarev A.B., Kazachek M.N., Bryukhovetskiy A.N. *Analiz sovremennykh metodov izyskaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Analysis of modern methods of surveying logging roads]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2023, no. 242, pp. 179–188.
- [4] Mogutnov R.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zavrazhnov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. *Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the*

- Main Parameter of the System. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology: proc. of the Int. Symp. «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), Grozny, 12–13 June 2019. V. 1. Grozny: Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: 10.2991/isees-19.2019.165
- [5] Berestnev O, Soliterman Y, Goman A Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines — One of the Key Problems of Engineering Science. Int. Symp. on History of Machines and Mechanisms Proceedings, 2000, pp. 325–332.
- [6] Kozlov V.G. *Metody, modeli i algoritmy proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s uchetoм vliyaniya klimata i pogody na usloviya dvizheniya* [Methods, models and algorithms for designing logging roads, taking into account the influence of climate and weather on traffic conditions]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Arkhangelsk, 2017, 406 p.
- [7] Bondarev A.B., Kozlov D.G. *Obsledovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Survey of the operational state of logging roads]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the international scientific and practical conference], Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 196–200.
- [8] Boykov P.A., Kozlov D.G. *Tselesoobraznost' meropriyatiy po povysheniyu tekhniko-ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh dorog* [Feasibility of measures to improve the technical and operational condition of logging roads]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the International Scientific and Practical Conference]. Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 190–195.
- [9] Borovlev A.O., Kozlov D.G., Tikhomirov P.V., Logoyda V.S. *Metodologiya proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methodology for designing logging roads]. *Problemy resursoobespechennosti i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: Materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of resource availability and prospects for the development of the agro-industrial complex: Proceedings of the national scientific and practical conference]. Voronezh, October 01, 2021. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2021, pp. 168–175.
- [10] Kozlov D.G., V Nikitin V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetskiy A.N., Sapelkin R.S., Tikhomirov P.V., Tveritnev O.N., Denisenko V.V. *Intellektual'nye sistemy proektirovaniya setey lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Intelligent systems for designing networks of logging roads]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2021, 206 p.
- [11] Konstantinov A.R. *Isparenie v prirode* [Evaporation in nature]. Leningrad: GIMIZ, 1968, 59 p.
- [12] Mezentsev V.S. *Raschety vodnogo balansa* [Water balance calculations]. Omsk: OmSKhI, 1976, 74 p.
- [13] Sidenko V.M. *Standartizatsiya i kontrol' kachestva v dorozhnom stroitel'stve* [Standardization and quality control in road construction]. Kyiv: Higher School, 1985, 256 p.
- [14] Nikitin V.V., Kozlov D.G., Skrypnikov A.A., Bryukhovetskiy A.N., Vikulin I.A., Zlobina N.I., Sapelkin R.S. *Metodicheskiy podkhod k raschetu udel'nykh zatrat pri stroitel'stve lesovoznykh dorog* [Methodical approach to the calculation of unit costs in the construction of logging roads]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Stroitelnye i dorozhnye mashiny], 2021, no. 12, pp. 50–54.
- [15] Nikitin V.V., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetskiy A.N., Tikhomirov P.V., Kozlov D.G., Sapelkin R.S., Prokopets V.S. *Metodika razrabotki normativov dlya proektirovaniya lesotransportnykh setey* [Methodology for the development of standards for the design of forest transport networks]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines], 2021, no. 12, pp. 45–49.
- [16] Prokopets V.S., Skrypnikov A.A., Kozlov D.G., Tikhomirov P.V., Bukreev V.Yu., Kazachek M.N. *Metodika provedeniya obsledovaniya ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methodology for conducting a survey of the operational state of logging roads]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines], 2022, no. 2, pp. 51–54.
- [17] Timofeev V.A., Tikhomirov P.V., Kozlov D.G., Tveritnev O.N., Skrypnikov A.A., Borovlev Yu.A., Shcherbakov E.D., Kazachek M.N., Zhuk A.Yu. *Issledovanie sostoyaniy podsistemy posledovatel'nogo analiza lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s prognozirovaniem ob'ema kontrol'no-priemochnykh izmereniy na osnove teorii Markovskikh sluchaynykh protsessov* [Investigation of the states of the subsystem of sequential analysis of logging roads with forecasting the volume of control and acceptance measurements based on the theory of Markov random processes]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Sistemy. Methods. Technologies], 2022, no. 3(55), pp. 146–151.
- [18] Kozlov D.G. *Analiz vidov i naznacheniy vedomstvennykh dorog* [Analysis of the types and purposes of departmental roads]. *Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the national scientific and practical conference], Voronezh, April 19–21, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 336–342.
- [19] Kozlov D.G. *Tekhnologicheskie osobennosti avtomobil'nykh lesovoznykh dorog* [Technological features of logging roads]. *Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the national scientific and practical conference], Voronezh, April 19–21, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 343–349.
- [20] Bondarev A.B., Kozlov D.G. *Obsledovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Survey of the operational state of logging roads]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the international scientific and practical conference], Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 196–200.
- [21] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Boltnev D.E., Borovlev A.O. Influence of natural and technogenic factors on the complexity of construction of timber highways. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 августа 2020 года). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012137.
- [22] Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural Models of Road Landscapes and Microlandscapes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 августа 2020 года). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012116.

- [23] Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Vysotskaya I.A., Bryukhovetskiy A.N., Nikitin V.V. *Sochetaniya krivolinyeynykh uchastkov plana i prodol'nogo profilya trassy lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Combinations of curvilinear sections of the plan and the longitudinal profile of the route of logging roads]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2021, no. 235, pp. 19–207.
- [24] Zhuk A.Yu., Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Boltnev D.E., Vysotskaya I.A. *Issledovanie matematicheskoy modeli rel'efa mestnosti pri proektirovanii avtomobil'nykh dorog* [Investigation of the mathematical model of the terrain in the design of highways]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2021, no. 2(50), pp. 88–93.
- [25] Popov V.N., Vasilenko V.N., Khvostov V.A., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Ivanov A.V., Belyaev A.N., Stukalo O.G. Security threats to personal data in the implementation of distance educational services using mobile technologies. *J. of Theoretical and Applied Information Technology*, 2021, v. 99, no. 15, pp. 3935–3946.

Authors' information

Bryukhovetskiy Andrey Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Voronezh State University of Engineering Technologies, bruhoveckiy@rambler.ru

Skrypnikov Aleksey Vasil'evich — Dr. Sci. (Tech.), Dean of the faculty of Management and computer science in technological systems, of the Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

Kozlov Dmitry Gennadievich  — Cand. Sci. (Tech.), Deputy Dean for Employment of the Faculty of Agricultural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dimvsau@mail.ru

Romanov Pavel Olegovich — External, Voronezh State University of Engineering Technologies, romanov_pa@yandex.ru

Boikov Pavel Aleksandrovich — External, Voronezh State University of Engineering Technologies, pboy-kov23@mail.ru

Kazachek Maria Nikolaevna — Candidate of the Department of Information Security, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, kazachekmaria@yandex.ru

Received 17.01.2023.

Approved after review 03.07.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest