

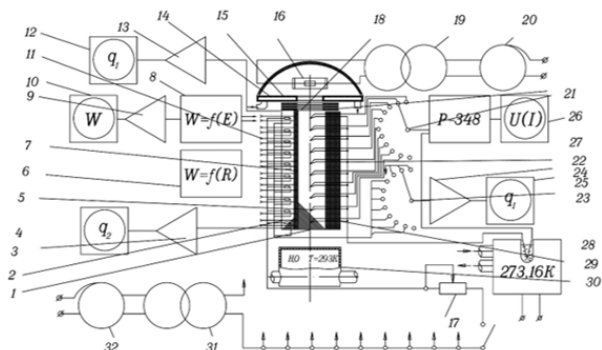
**А.Н. Брюховецкий, А.В. Скрыпников, Ю.Ю. Володина,
Д.Д. Мирзоев, А.С. Сергеев, А.С. Карпов**

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Введение. Изучение тепловлажностных свойств (ТВС) грунтов дискретными методами сопряжено с рядом объективных трудностей. Во-первых, подготовка серии образцов с одинаковыми физико-механическими свойствами грунтов для отдельного определения тепловых характеристик и влажностных свойств является трудоемкой задачей. Во-вторых, сложно учесть влияние неоднородности структуры скелета исследуемого грунта на физико-тепловые и тепловлажностные свойства. В-третьих, от опыта к опыту технически сложно воспроизводить граничные условия эксперимента. Тепловые и влажностные коэффициенты, как это было установлено, имеют взаимное влияние. [Чирков и др., 2021; Никитин и др., 2022; Боровлев и др., 2021; Смирнов и др., 2017].

Материалы и методика исследования. Для исследования тепловлажностных свойств грунтов наиболее перспективными являются комплексные методы, так как они позволяют на основе испытания одного образца определить одновременно тепловые характеристики и влажностные свойства грунтов. Для изучения ТВС грунтов была разработана и собрана специальная установка для комплексного определения основных тепловых характеристик и влажностных свойств. Блок-схема установки представлена на (рис. 1).

В основу предлагаемого метода положено теоретическое решение. Исследуется тепломассообмен в пластине толщиной l . Пластиной считается стержень, у которого выполняется условие $\partial t / \partial y = 0$; $\partial W / \partial y = 0$ (рис. 2). Одномерность тепловых и влажностных потоков в данном методе исследования ТВС грунтов реализуется за счет применения специальных компенсационных нагревателей, т. е. созданием адиабатической оболочки вдоль образца [Мацнев и др., 2021].



1, 18, 21 – теплотрические датчики; 2 – оболочка; 3, 9, 13, 24 – усилители; 4, 10, 12, 25 – самопишущие миллиамперметры; 5 – термопары; 6, 8 – влагомеры; 7 – датчики влажности; 11 – штекерные гнезда; 14, 15 – диафрагмы; 16 – источник тепла; 17 – резисторы; 19, 20, 31, 33 – трансформаторы; 22 – компенсационные нагреватели; 23, 26 – переключатели; 27 – потенциометр; 28 – термостат; 29 – контейнер; 30 – холодильник. ¶

Рис. 1. Блок-схема установки для комплексного определения ТВС

Fig. 1. Block diagram of the installation for the complex determination of thermal and moisture properties

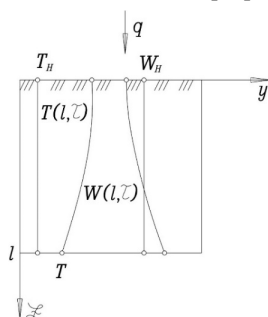


Рис. 2. Поле влажности и поле температуры в исследуемом образце

Fig. 2. Humidity field and temperature field in the test sample

Геометрическую форму образцов для исследования ТВС использовали двух видов: длинные цилиндрические стержни – для моделирования теплообмена (ТМО) в грунтах; короткие стержни (пластины) – для определения ТВС.

Длина стержня составила 0,2 м, диаметр $4 \cdot 10^{-2}$ м. Пластины (короткие стержни) имели толщину от $1 \cdot 10^{-2}$ до $4,5 \cdot 10^{-2}$ м. Для исследований применяли образцы грунтов с однородными свойствами по всему объему.

Начальные условия в образце $t(z, 0) = t_n$, $W(z, 0) = W_n$ выполняли, выдерживая образец в контейнере перед испытаниями до полного выравнивания значений температуры и влажности по всему объему.

В качестве граничных условий эксперимента был задан стабильный тепловой поток $-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \big|_{x=0} = q$. Плотность теплового потока q составляла $1 \cdot 10^3$ Вт/м². Под его воздействием один торец образца нагревался по закону $t = (0, \tau) = t_n + m_1 \tau$, а второй $t = (l, \tau) = t_n + m_2 \tau$.

Источник тепла, применяемый в установке, характеризуется следующими параметрами: источник заданной интенсивности q , положительный, плоский, внешний, непрерывного действия, постоянный во времени, неподвижный.

Продолжительность опытов при моделировании тепломассообмена (ТМО) на стержнях определяется временем, необходимым для появления ощутимых градиентов влаги по координате z (рис. 2). Для экспресс-метода – изменением величины абсолютной влажности на противоположном нагреву торце исследуемого образца.

Основным элементом установки является пластмассовый контейнер для размещения исследуемых образцов, выполненный из оргстекла ($\lambda_k = 0,041$ Вт/(м·К)). Стенки контейнера из-за низкой теплопроводности не могут быть тепловым шунтом исследуемых образцов, так как λ_k приблизительно в 20 раз меньше по теплопроводности, чем испытываемые грунты. В тело контейнера вмонтировано 10 емкостных датчиков влажности, установленных с шагом $2 \cdot 10^{-2}$ м. Выбор количества датчиков обоснован минимумом точек, с помощью которых можно построить лекальную кривую без разрывов. В тело контейнера вклеены радиальные датчики теплового потока, воспринимающие только потоки тепла оси y . На контейнер надеты девять колец с компенсационными нагревателями, выполненными из константановой проволоки диаметром $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Выводы от радиальных датчиков теплового потока и компенсационных нагревателей припаяны к клеммнику, смонтированному на нижнем торце контейнера. Выводы от емкостных датчиков подведены к специальным штекерным разъемам, установленным вдоль образующей защитного корпуса контейнера.

Ввод термопар внутрь образцов осуществляли с помощью медицинских игл, на концах которых закреплены медьконстантановые спаи.

Контейнер закреплен между двумя прямоугольными металлическими фланцами. С помощью тросов и обоймы контейнер с фланцами монтировали на вертикальную цилиндрическую стойку, где укреплен источник тепла. С помощью охлаждаемых диафрагм осуществляли фокусировку излучения источника тепла. Под контейнером, на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м, установлен холодильник, через который прокачивали воду со стабильной температурой.

Радиальные датчики теплового потока поочередно подключали с помощью переключателя на вход компенсационного усилителя. Усилитель нагружен стрелочным индикатором с нулевым положением стрелки. Компенсацию теплового потока растечки осуществляли подачей напряжения на нагреватель. Величину напряжения компенсации устанавливали регулируемым автотрансформатором, понижающим трансформатором и резисторами.

Измерение температур на горизонтах осуществляли медьконстантановыми термопарами. Стабилизацию «холодных» спаев производили при температуре 273,16 К.

Термопары поочередно подключали на вход полуавтоматического потенциометра. Сигналы от температурных датчиков (ТД) поступали на вход усилителей. Величину усиленных сигналов контролировали самопишущими милливольтметрами. Измерение влажности вдоль образца осуществляли емкостными кольцевыми датчиками, вмонтированными внутрь цилиндрического контейнера. Датчик измеряет влажность прилегающего к нему грунта на глубину до $5 \cdot 10^{-3}$ м. Измерение влажности осуществляли электронным влагомером, подключая его поочередно к штекерным гнездам. Для повышения чувствительности электронного влагомера использовали усилитель постоянного тока с самопишущим миллиамперметром. Для дублирования результатов измерений влажности применяли кондуктометрический метод, основанный на измерении проводимости грунтов. Измерение проводимости производили омметром, которым выполняли контроль однородности уплотнения грунта в контейнере.

Для определения ТВС тяжелого суглинка грунт предварительно увлажняли дистиллированной водой до определенных значений влажности и выдерживали в течение суток для равномерного распределения влаги. Перед уплотнением грунта в контейнере, отбирали три пробы для контроля начальной влажности методом высушивания и вычисляли ее среднее значение. Исследуемый грунт засыпали мерными порциями и уплотняли. Однородности уплотнения контролировали датчиками. После установки ТД в грунт, контейнер закрывали алюминиевой фольгой и герметизировали сургучом.

Вычисляли объемный вес влажного грунта:

$$\gamma = P/V, \quad (1)$$

где P – вес влажного грунта, кг; V – объем грунта, м³.

Объемный вес скелета определяли по формуле:

$$\delta = \frac{\gamma}{1 + \frac{W}{100}}, \quad (2)$$

где W – абсолютная влажность, %.

Коэффициент уплотнения грунта:

$$K_y = \frac{\delta_{ст}}{\delta}, \quad (3)$$

где δ – стандартная плоскость, кг/м³.

Исследования ТВС грунтов производили для коэффициента уплотнения грунта K_y и относительной влажности грунта $W_{от}$.

Определение удельной теплоемкости грунта производили по следующей методике. Определяли с помощью ТД приращение теплового потока в образце за нормированный отрезок времени:

$$\Delta q = (q_4 - q_3) - (q_2 - q_1), \quad (4)$$

где q_1, q_2 – тепловые потоки на выходе и входе из образца в момент времени τ_1 ; q_3, q_4 – тепловые потоки на выходе и входе из образца в момент времени τ_2 .

Определяли приращение температуры Δt за нормированный отрезок времени:

$$\Delta t = (t_4 - t_3) - (t_2 - t_1), \quad (5)$$

где t_1, t_2 – температуры нижней и верхней плоскостей образца в момент времени τ_1 ; t_3, t_4 – температуры нижней и верхней плоскостей образца в момент времени τ_2 .

Зная площадь S и вес образца p , удельную теплоемкость можно выразить:

$$C = \frac{\Delta q \cdot S \cdot \Delta t}{p \cdot \Delta t}, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}. \quad (6)$$

Определение теплопроводности производили после наступления стационарного режима момент времени τ_3 .

Теплопроводность λ определяли из соотношения

$$\lambda = \frac{ql}{t_5 - t_6}, \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; l – длина образца, м; t_5, t_6 – температуры на нижней и верхней плоскостях образца в момент времени τ_3 , К.

Поток жидкой фазы влаги совпадает с направлением теплового потока. Спустя определенный отрезок времени после включения источника тепла, в образце возникает градиент влажности. Влагоперенос за этот отрезок времени осуществляется в основном за счет парообразной влаги, так как скорость ее распространения намного превышает скорость распространения жидкой фазы. Градиент влажности в образце можно выразить:

$$\Delta W_n = \frac{W_1 - W_2}{l}, \text{ 1/м}, \quad (8)$$

где W_1 и W_2 – влажности на границах образца длиной l .

Для определения численного значения величиной ΔW_n , измеряем W_1 и W_2 электронным влагомером и емкостными датчиками, установленными внутри контейнера на границах образца.

Поток парообразной влаги q_n можно записать:

$$q_n = \frac{\Delta P_n}{S \cdot \Delta \tau}, \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}, \quad (9)$$

где ΔP_n – приращение веса влаги, кг.

Перемещение парообразной влаги в образце происходит, в основном, за счет действия температурного градиента. Коэффициент, характеризующий перемещение парообразной влаги b_n за счет температурного градиента, можно выразить:

$$b_n = \frac{\Delta W_n}{\Delta t}, \text{ 1/К}. \quad (10)$$

Пользуясь выражениями (9) и (10), коэффициент, характеризующий перемещение парообразной влаги, запишем:

$$a_n = \frac{q_n}{\delta b_n \Delta t}, \quad (11)$$

где δ – плотность грунта, кг/м³.

При проявлении в образце определенного градиента влажности, нагрев образца прекращали. Скорость остывания образца намного превышает скорость миграционных процессов. Практически через несколько минут в образце наступает тепловое равновесие, и дальнейший механизм переноса влаги будет осуществляться за счет переноса жидкой фазы. Градиент жидкой фазы можно выразить:

$$\Delta W_{\text{ж}} = \frac{W_1 - W_2}{l}, \text{ 1/м.} \quad (12)$$

Поток жидкой фазы влаги равен:

$$q_{\text{ж}} = \frac{\Delta P_{\text{ж}}}{S \cdot \Delta \tau}, \text{ кг/м}^2\text{с}, \quad (13)$$

где $\Delta P_{\text{ж}} = \Delta W_{\text{ж}} \cdot \delta$; $\Delta W_{\text{ж}}$, – градиент жидкой фазы.

Коэффициент, характеризующий перемещение жидкой фазы, можно выразить:

$$a_{\text{ж}} = \frac{q_{\text{ж}}}{\delta \cdot W_{\text{ж}}}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (14)$$

Результаты исследования. Были выполнены многочисленные комплексные измерения ТВС связных грунтов для относительных влажностей в диапазоне от 0,4 до 0,8 W_t при коэффициентах уплотнения K_y от 0,8 до 1,05.

На основании полученных данных построен график изменения во времени температуры на концах образца T_1 и T_2 , теплового потока на входе в образец q_1 и на выходе q_2 , и влажности W вдоль оси образца (рис. 3).

Образец высотой 0,02 м и диаметром 0,04 м прогревали источником тепла с плотностью теплового потока на входе до 0,9 кВт/м², т. е. приближенно равным радиационному потоку солнца на поверхности земляного полотна. В результате действия источника тепла в течение $18 \cdot 10^3$ с в образце возникал градиент температуры ∇t равный 625 К/м и градиент влажности ∇W равный 6,25 1/м. После наступления в образце регулярного теплового режима ($F_0 > 0,55$) измеряли приращение теплового потока Δq и приращение температуры Δt за период Δt . Используя данные (рис. 3), определяли значения $\Delta q = 70$ Вт/м² и $\Delta t = 0,83$ К. Подставляя в выражение (8) значение $S = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м², $p = 48,75 \cdot 10^{-3}$ кг, $\Delta \tau = 6 \cdot 10^2$ с и данные, полученные из рис. 3, вычисляли удельную теплоемкость грунта $C = 1,29$ кДж/(кг·К). Коэффициент теплопроводности грунта λ определяли после наступления в образце стационарного теплового режима ($\Delta t \approx 0$). Подставляя данные из рис. 3 $q = 0,9$ кВт/м², $\Delta t = 12,25$ К в выражение (8), определяли коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,46$ Вт/м².

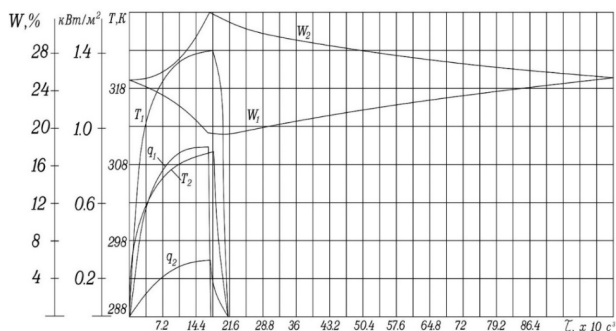


Рис. 3. Изменение температуры T_1 , T_2 , тепловых потоков q_1 , q_2 и влажностей W_1 , W_2 , из тяжелого суглинка W_t 41,4%

Fig. 3. Change in temperature T_1 , T_2 , heat fluxes q_1 , q_2 and humidity W_1 , W_2 , from heavy loam W_t 41,4%

Подставляя значение ΔW в выражение (9), находим $b_n = 0,01$ (1/K). Приращение веса влаги ΔP можно записать:

$$\Delta P = \Delta W \cdot \delta, \quad (15)$$

где ΔW – приращение влажности в доли единицы.

Выполнив ряд промежуточных расчетов по определению q_n , согласно выражению (9) и подставив значения q_n в выражение (11), определяли коэффициент, характеризующий перемещение парообразной влаги $a_n = 0,88 \cdot 10^{-8}$ (м²/с). Используя выражения (12)–(14) и данные экспериментальных исследований, отраженных на рис. 3, определяли коэффициент влагопроводности жидкой фазы $a_{ж} = 0,34 \cdot 10^{-8}$ (м²/с).

По аналогичной методике производим расчет значений a_n , b_n , $Q_{ж}$ для тяжелого суглинка с относительными влажностями 0,4; 0,5; 0,7 и 0,8 при коэффициентах уплотнения K_y – 0,8; 0,9 и 1,05.

По данным расчетов построен график (рис. 4) зависимостей коэффициентов влагопроводности парообразной влаги a_n и жидкообразной влаги $a_{ж}$ от влажности при различных коэффициентах уплотнения грунтов. Как видно из графика (рис. 4), интенсивность миграции парообразной влаги по мере увеличения влажности снижается. Это явление объясняется тем, что с изменением влажности грунта фазовый состав влаги изменяется. Процентное содержание парообразной фазы с увеличением влажности снижается, что приводит к уменьшению интенсивности влагообмена.

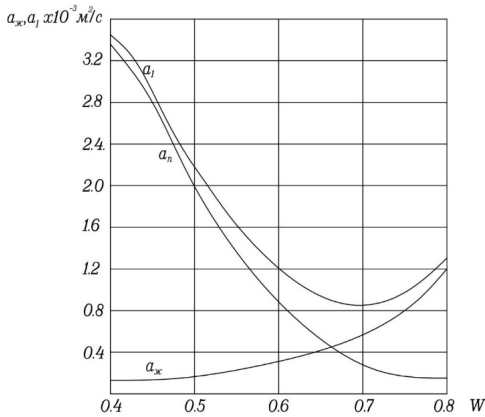


Рис. 4. Значение коэффициентов влагопроводности a_n , a_j , a_1 , для тяжелого суглинка W 41,4% при различных влажностях

Fig. 4. The value of the moisture conductivity coefficients a_n , a_j , a_1 , for heavy loam W 41,4% at various humidity

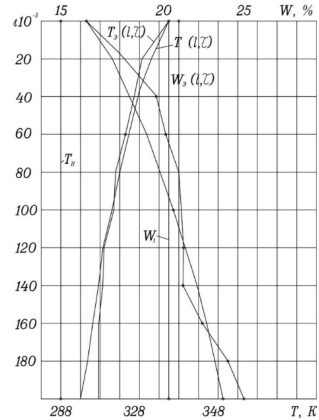


Рис. 5. Сравнение экспериментальных значений температур $T_3(l, \tau)$ и $W(l, \tau)$ для образца из тяжелого суглинка W_T 41,4%

Fig. 5. Comparison of experimental temperatures $T_3(l, \tau)$ and $W(l, \tau)$ for a sample from heavy loam W_T 41,4%

Величина коэффициента, характеризующего влагопроводность за счет жидкой фазы, по мере увеличения влажности грунта монотонно увеличивается. Коэффициенты a_n и a_j для грунта с относительной влажностью 0,65 W_T равны между собой. Влагообмен в грунтах, как это видно из рис. 4, в диапазоне влажностей от 0,4 до 0,6 W_T , и далее диффузия влаги происходит за счет жидкой фазы, но интенсивность этих процессов снижается.

По мере увеличения коэффициентов уплотнения грунтов интенсивность диффузии пара и жидкой фазы уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением плотности скелета грунта количество пор, содержащих паровоздушную смесь, пропорционально уменьшается, что приводит к снижению интенсивности влагообмена.

Прибор для комплексного определения ТВС грунтов позволяет исследовать характер изменения во времени и по глубине полей тепла и влаги. Для проведения таких измерений применяли образцы длиной 0,2 м, которые прогревали источником тепла в течение $1 \cdot 10^5$ с. В результате длительного воздействия теплового излучения интенсивностью порядка 1 кВт/м² в образце возникал градиент тепла и влаги. На рис. 5 приведены кривые, характеризующие теоретическое распределение тепла и влаги – $W(l, \tau)$, $T(l, \tau)$ и полученные экспериментально – $W_3(l, \tau)$, $T_3(l, \tau)$. Как видно из рисунка, расхождение между теоретическими и экспериментальными кривыми не превышает $\pm 6\%$.

Для образцов из тяжелого суглинка высотой 0,04 м было проведено имитационное моделирование и расчеты изменения во времени полей температур и влажностей.

Для образцов высотой 0,04 м, выполненных из тяжелого суглинка, поля температур и влажностей были рассчитаны при постоянных коэффициентах a и a_1 . Поле температур для различных τ изображено на рис. 6, а влажности – на рис. 7.

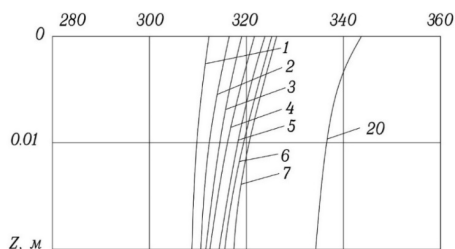


Рис. 6. Изменение температуры в образце из тяжелого суглинка ($W 41,4\%$) по глубине при различных временных интервалах: 1–7, 20 – время после начала опыта

Fig. 6. Temperature change in the sample from heavy loam ($W 41,4\%$) in depth at different time intervals: 1–7, 20 – time after the start of the experiment

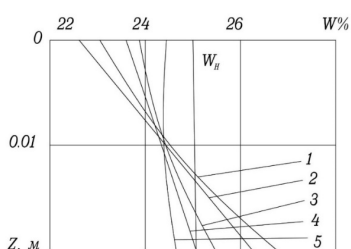


Рис. 7. Изменение влажности в образце из тяжелого суглинка ($W 41,4\%$) по глубине при различных временных интервалах: 1–5 – время после начала опыта

Fig. 7. Change in moisture content in a sample from heavy loam ($W 41,4\%$) in depth at different time intervals: 1–5 – time after the start of the experiment

Для применимости результатов теоретических и экспериментальных исследований. при изучении ТВС грунтов при других температурных напорах и градиентах влажностей, построены зависимости безразмерной температуры θ в безразмерной функции критерия F_0 (рис. 8 и 9).

Сравнение коэффициента влагопроводности жидкой фазы $a_{ж}$ с коэффициентом температуропроводности a дает возможность определить скорости выравнивания температурных и влажностных полей. Как следует из данных ТВС тяжелых суглинков, в диапазоне влажностей от $0,4$ до $0,8W_T$, температурное поле значительно опережает скорость выравнивания влажностного поля. Подставляя значение a и $a_{ж}$ для влажности $0,4 W_T$ в безразмерный критерий L_u , получим

$$L_u = \frac{a_{ж}}{a} = \frac{3,76 \cdot 10^{-8}}{0,43 \cdot 10^{-6}} = 8,76 \cdot 10^{-2}.$$

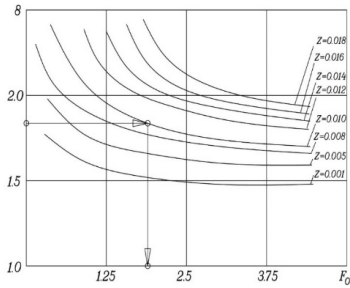


Рис. 8. Изменение безразмерной температуры в образце из тяжелого суглинка ($W 41,4\%$) на различных глубинах Z в функции критерия F_0

Fig. 8. Variation of the dimensionless temperature in a heavy loam sample ($W 41,4\%$) at different depths Z as a function of the F_0 criterion

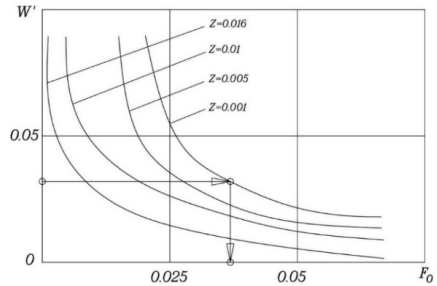


Рис. 9. Изменение безразмерной влажности W' в образце из тяжелого суглинка ($W 41,4\%$) на различных глубинах Z в функции критерия F_0

Fig. 9. Change in the dimensionless moisture content W' in a sample of heavy loam ($W 41,4\%$) at different depths Z as a function of the criterion F_0

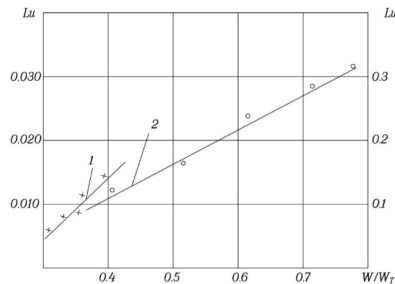


Рис. 10. Значение безразмерного критерия для тяжелого суглинка $W = 41,4\%$ и песка при различных влажностях: 1 – песок; 2 – суглинок

Fig. 10. The value of the dimensionless criterion for heavy loam $W = 41,4\%$ and sand at different humidity: 1 – sand; 2 – loam

Значение критерия L_u для влажностей в диапазоне от $0,4$ до $0,8W_t$ приведено на рис. 10. Как видно из рис. 10, для тяжелых суглинков критерий $L_u < 1$. Это дает право применять стационарные методы расчетов водно-теплового режима грунтов.

Обсуждение. Результаты измерений можно рассматривать как значения случайной величины X . Математическое ожидание $M[X]$ равно точно-му значению измеряемой величины x плюс систематическая ошибка.

Среднеарифметическое нескольких неизвестных измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \approx M[X] \quad (16)$$

является приближенным значением измеряемой величины, причем с тем большей надежностью, чем больше число измерений n . Однако $\bar{x}$ может сколь угодно отличаться от $M[X]$, хотя вероятность такого события ничтожно мала.

Ошибка приближенного равенства (16) носит вероятностный характер и описывается доверительным интервалом β , т. е. границей, которую с доверительной вероятностью p_0 не превышает разность $|\bar{x} - M[X]|$. Следовательно:

$$P\{|\bar{x} - M[X]| \leq \beta\} = p_0.$$

Доверительную вероятность выбираем, исходя из практических соображений, связанных с применениями полученных результатов. Во многих физических измерениях $p_0 = 0,98$; $0,98$ считается достаточной. В измерениях авторы принимали $p_0 = 0,95$.

Из таблицы коэффициентов Стьюдента видно, что при $n = 2$ доверительный интервал β слишком велик, так что следует производить не менее 3–4 измерений.

При дальнейшем увеличении n коэффициенты Стьюдента убывают слабо, и доверительный интервал сужается довольно медленно.

Поэтому обычно считают нецелесообразным $n > 5-10$, так как возрастающая трудоемкость эксперимента не оправдывается достигаемой точностью.

Отличить грубую ошибку от случайной не всегда легко. Но, если число измерений мало, как в нашем случае, то широк доверительный интервал и даже значительные отклонения от среднего в него укладываются.

Была выполнена статистическая обработка измерений тепловых потоков q , теплопроводности λ , температуропроводности a , влагопроводности a_1 , термовлагопроводности b_1 , влажности W с целью определения относительной погрешности и необходимого числа измерений.

На основе данных измерений с применением формул (17)–(21) и таблиц коэффициентов Стьюдента были найдены относительная погрешность, истинное значение измеряемой величины x_g и необходимое минимальное значение измерений n .

Оценку случайной ошибки измерения производили по критерию Стьюдента, так как число измерений, как правило, невелико ($n < 20$).

$$D[X] \approx S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (17)$$

где S – стандарт выборки.

Связь доверительного интервала со стандартом выборки устанавливается критерием Стьюдента:

$$\beta = t(p_0, n) S_n, \quad S_n = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (18)$$

где коэффициенты Стьюдента берутся из таблиц.

Найдя доверительный интервал β , вычисляем действительное значение измеряемой величины:

$$x_g = \bar{x} \pm \beta. \quad (19)$$

Далее оценим относительную погрешность результатов серии измерений при заданной доверительной вероятности $p_0 = 0,95$

$$\gamma = \frac{\beta}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (20)$$

За счет увеличения числа измерений n можно уменьшать доверительный интервал. Однако систематическая ошибка β_0 при этом не уменьшается, так что суммарная ошибка все равно будет больше β_0 . Поэтому целесообразно выбрать n , так чтобы ширина доверительного интервала составляла 50–100% β_0 .

Дальнейшее увеличение числа измерений бессмысленно

$$t(p_0, n) \leq \frac{\sqrt{n}}{S} \beta_0, \quad (21)$$

где $t(p_0, n)$ – коэффициенты Стьюдента.

Заключение. На основе выполненных экспериментальных исследований представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Исследована стабильность работы генераторов электронного влагомера и влияние температур и плотностей грунта на его показания.

2. Получены значения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости для суглинков, супесей и исследовано влияние плотности и влажности на их величину.

3. Исследованы ТВС грунтов при различных влажностях и коэффициентах уплотнения. Определены основные теплофизические характеристики и влажностные свойства тяжелых суглинков различных плотностей. Построены зависимости изменения безразмерной температуры грунтов, произведено сравнение теоретических полей влажности и температуры с полученными из эксперимента.

4. Произведена статистическая обработка экспериментальных данных. Вероятностными методами была произведена оценка точности измерений коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, влагопроводности, термовлагопроводности, величины удельных тепловых потоков и влажности и определено необходимое количество измерений.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Болтнев Д.Е. и др. Интегрирование дифференциального уравнения движения автомобиля на основе аналитического выражения динамической характеристики // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 10. С. 33–37.

Боровлев А.О., Высоцкая И.А. и др. Повышение эффективности лесовозных автомобильных дорог // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 4. С. 9–13.

Гулевский В.А. и др. Экспериментальная оценка сцепных качеств и ровности покрытий при различных состояниях автомобильных дорог и погодных условиях // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 1 (56). С. 112–118.

Козлов В.Г. и др. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. № 6 (366). С. 117–127.

Мацнев М.В. и др. Количественная оценка влияния климатических факторов на создание сезонных заделов и темпы специализированных дорожно-строительных потоков // Строительные и дорожные машины. 2021. № 5. С. 18–24.

Никитин В.В. и др. Проектирование схем транспортного освоения лесных массивов с применением информационно-интеллектуальных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76. № 3. С. 130–134.

Сивков Е.Н. и др. Условия движения по лесовозным дорогам // В сборнике: Изучение лесосырьевой базы Республики Коми: научно-методический аспект // Разработка научных основ и практических рекомендаций по переводу лесосырьевой базы Республики Коми на инновационную интенсивную модель расширенного воспроизводства на 2015–2020 годы: сб. матер. науч.-практич. конф. по научной теме института / отв. ред. Е.В. Хохлова. 2017. С. 19–23.

Смирнов М.Ю. и др. Использование укрепленных грунтов, местных материалов и отходов промышленности для строительства дорожных одежд лесных дорог. Йошкар-Ола, 2017.

Смирнов М.Ю., Скрыпников А.В., Козлов В.Г. и др. Повышение эффективности функционирования автомобильных дорог лесного комплекса Йошкар-Ола, 2016.

Стородубцева Т.Н. и др. Сопротивление движению как качественный показатель состояния лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. 2022. № 2. С. 35–40.

Чирков Е.В. и др. Методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной автомобильной дороги с применением методов оптимизации // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 60–65.

Logoida V.S. et al. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. Vol. 8, no. 5. P. 2178–2183.

Nikitin V.V. et al. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas // SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. Vol. 69, no. 12. P. 175–178.

Skrypnikov A.V. et al. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, no. 2. P. 511–515.

References

Boltnev D.E. et al. Integration of the differential equation of vehicle motion based on the analytical expression of the dynamic characteristic. *Repair. Recovery. Modernization*, 2021, no. 10, pp. 33–37. (In Russ.)

Borovlev A.O., Vysotskaya I.A. et al. Improving the efficiency of logging roads. *Modern science-intensive technologies*, 2021, no. 4, pp. 9–13. (In Russ.)

Chirkov E.V. et al. Methodological recommendations for automated design of the logging road route using optimization methods. *Automation. Modern technologies*, 2021, vol. 75, no. 2, pp. 60–65. (In Russ.)

Gulevsky V.A. et al. Experimental assessment of grip qualities and evenness of coatings under various conditions of roads and weather conditions. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*, 2018, no. 1 (56), pp. 112–118. (In Russ.)

Kozlov V.G. et al. Theoretical foundations and methods of mathematical modeling of logging roads. *IVUZ. Forest magazine*, 2018, no. 6 (366). (In Russ.)

Logoida V.S. [et al.] Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 2178–2183.

Matsnev M.V. et al. Quantitative assessment of the influence of climatic factors on the creation of seasonal reserves and the pace of specialized road construction flows. *Construction and road machines*, 2021, no. 5, pp. 18–24. (In Russ.)

Nikitin V.V. et al. Designing schemes for the transport development of forests using information and intelligent systems. *Automation. Modern technologies*, 2022, vol. 76, no. 3, pp. 130–134. (In Russ.)

Nikitin V.V. et al. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 175–178.

Sivkov E.N. et al. Driving conditions on logging roads. *Study of the timber resource base of the Komi Republic: scientific and methodological aspect*. Collection of materials of the scientific-practical conference on the scientific theme of the institute «Development of scientific foundations and practical recommendations for the transfer of the forest resource base of the Republic of Komi to an innovative intensive model of expanded reproduction for 2015–2020». Managing editor E.V. Khokhlova. 2017, pp. 19–23. (In Russ.)

Skrypnikov A.V. et al. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 511–515.

Smirnov M.Yu. et al. Use of reinforced soils, local materials and industrial waste for the construction of road pavement for forest roads. Yoshkar-Ola, 2017. (In Russ.)

Smirnov M.Yu., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G. et al. Improving the efficiency of the functioning of forest roads Yoshkar-Ola, 2016. (In Russ.)

Storodubtseva T.N. et al. Resistance to movement as a qualitative indicator of the condition of logging roads. *Construction and road machines*, 2022, no. 2, pp. 35–40. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 22.03.2023

Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В., Володина Ю.Ю., Мирзоев Д.Д., Сергеев А.С., Карпов А.А. Комплексные исследования тепловлажностных свойств грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 246. С. 331–349. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.246.331-349

В статье описана методика исследования тепловлажностных свойств грунтов комплексными методами, позволяющими на основе испытания одного образца определять одновременно и тепловые характеристики, и влажностные свойства грунтов. Представленная методика реализована с помощью специально разработанной установки для комплексного определения тепловлажностных свойств грунтов. В итоге получены значения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости для суглинков, супесей и исследовано влияние плотности и влажности на их величину. Исследованы ТВС грунтов при различных влажностях и коэффициентах уплотнения. Определены основные теплофизические характеристики и влажностные свойства тяжелых суглинков для различных влажностей и плотностей. Произведена статистическая обработка измерений с целью определения относительной погрешности и необходимого числа измерений.

Ключевые слова: тепловлажностные свойства грунтов, тепломассообмен, тепловые характеристики, комплексные методы, земляное полотно, лесовозные автомобильные дороги.

Bryukhovetsky A.N., Skrypnikov A.V., Volodina Yu.Yu., Nachalov A.L., Sergeev A.S., Karpov A.A. Comprehensive studies of the thermal and moisture properties of subgrade soils of logging roads. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2023, iss. 246, pp. 331–349 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.246.331-349

The article describes a methodology for studying the thermal and moisture properties of soils by complex methods that allow determining both thermal characteristics and moisture properties of soils on the basis of testing a single sample. The presented technique is implemented with the help of a specially developed installation for the complex determination of thermal and moisture properties of soils. As a result, the values of the coefficients of thermal conductivity, thermal conductivity and specific heat capacity for loams, sandy loams were obtained, and the effect of density and humidity on their magnitude was investigated. The fuel assemblies of soils at various humidities and compaction coefficients were studied. The main thermophysical characteristics and humidity properties of heavy loams for various humidities and densities are determined. Statistical processing of measurements was carried out in order to determine the relative error and the required number of measurements.

Keywords: thermal and moisture properties of soils, heat and mass transfer, thermal characteristics, integrated methods, subgrade, logging roads.

БРЮХОВЕЦКИЙ Андрей Николаевич – докторант Воронежского государственного университета инженерных технологий, кандидат технических наук. SPIN-код: 1062-8296. ORCID: 0000-0003-3247-3411.

394036, пр. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия. E-mail: bryhovetskeian@yandex.ru

BRYUKHOVETSKY Andrey N. – PhD (Technical), doctoral student of Voronezh State University of Engineering Technologies. SPIN-code: 1062-8296. ORCID: 0000-0003-3247-3411.

394036. Revolution av. 19. Voronezh. Russia. E-mail: bryhovetskeian@yandex.ru

СКРЫПНИКОВ Алексей Васильевич – декан факультета управления и информатики в технологических системах Воронежского государственного университета инженерных технологий, профессор, доктор технических наук. SPIN-код: 5091-4139. ORCID: 0000-0003-1073-9151.

394036, пр. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия. E-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru

SKRYPNIKOV Aleksey V. – DSc (Technical), Dean of the Faculty of Control and Informatics in Technological Systems of the Voronezh State University of Engineering Technologies, Professor. SPIN-code: 5091-4139. ORCID: 0000-0003-1073-9151.

394036. Revolution av. 19. Voronezh. Russia. E-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru

ВОЛОДИНА Юлия Юрьевна – преподаватель Воронежского государственного университета инженерных технологий. SPIN-код: 8079-1260. ORCID: 0000-0003-2768-1937.

394036, пр. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия. E-mail: juliya_volodina@mail.ru

VOLODINA Yuliya Yu. – Lecturer at Voronezh State University of Engineering Technologies. SPIN code: 8079-1260. ORCID: 0000-0003-2768-1937.

394036. Revolution av. 19. Voronezh. Russia. E-mail: juliya_volodina@mail.ru

МИРЗОЕВ Давид Джаван оглы – экстерн Воронежского государственного университета инженерных технологий. ORCID: 0009-0003-1303-8104.

394036, пр. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия. E-mail: belov_david@list.ru

MIRZOEV David D. – external student of Voronezh State University of Engineering Technologies. ORCID: 0009-0003-1303-8104.

394036. Revolution av. 19. Voronezh. Russia. E-mail: belov_david@list.ru

СЕРГЕЕВ Андрей Сергеевич – экстерн Воронежского государственного университета инженерных технологий. SPIN-код: 4351-0337. ORCID: 0009-0008-2007-1654.

394036, пр. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия. E-mail: Zzverdvd@mail.ru.

SERGEEV Andrey S. – external student of Voronezh State University of Engineering Technologies. SPIN-code: 4351-0337. ORCID: 0009-0008-2007-1654.

394036. Revolution av. 19. Voronezh. Russia. E-mail: Zzverdvd@mail.ru.

КАРПОВ Александр Сергеевич – экстерн Воронежского государственного университета инженерных технологий.

394036, пр. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия. E-mail: binokl-82@yandex.ru.

KARPOV Alexander S. – external student of Voronezh State University of Engineering Technologies.

394036. Revolution av. 19. Voronezh. Russia. E-mail: binokl-82@yandex.ru.