

УДК 630*383.2

UDC 630*383.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСОВОЗНЫХ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

**STUDY OF SOIL MOISTURE FOR LOGGING
ROADS**

Скрыпников Алексей Васильевич
д.т.н., профессор

Skrypnikov Aleksey Vasilyevich
Dr.Sci.Tech., professor

*Воронежская государственная лесотехническая
академия, Воронеж, Россия*

*Voronezh State Academy of Forestry and Technologies,
Voronezh, Russia*

В статье представлен анализ статистической структуры устойчивости влажности грунта и коэффициента увлажнения. Разработана математическая модель прогноза влажности грунта земляного полотна, позволяющая определить фактическую или расчётную влажность любого типа грунта естественного увлажнения в пределах деятельного слоя 2,0 м по данным наблюдений за температурой и дефицитом влажности воздуха

The analysis of the statistical structure of the soil humidity stability and the precipitation-evaporation ratio is represented in the article. The mathematical model of the subgrade humidity forecast allowing evaluating actual or designing humidity of the any soil type with the natural humidification in the range of active layer 2.0 m according to the observed temperature and air humidity deficiency data is worked out

Ключевые слова: ЛЕСОВОЗНАЯ
АВТОМОБИЛЬНАЯ ДОРОГА, ВЛАЖНОСТЬ,
ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО, ТЕМПЕРАТУРА
ВОЗДУХА

Keywords: LOGGING ROAD, HUMIDITY, ROAD
BED, AIR TEMPERATURE

Земляное полотно – один из основных элементов лесовозной автомобильной дороги, от устойчивости, прочности и долговечности которого зависит работоспособность дорожных одежд и всего сооружения.

Воздействие на дорожное покрытие со стороны нижележащих слоёв, вызываемое нарушениями водно-теплого режима работы всей конструкции, приводит к разрушению всей дорожной одежды. Для повышения долговечности и прочности дорожной одежды необходимо спрогнозировать влажность грунта в основании земляного полотна.

Алгоритм расчёта включает в себя блок формирования массива данных среднемесячной влажности грунтов (по данным АМС, расчётным методом, по коэффициенту увлажнения), блок линейной экстраполяции влажности грунтов на 1 сезон, блок формирования выходного массива среднемесячной влажности грунтов на планируемом участке возведения земляного полотна за 1 сезон. Наиболее объективными являются многолетние данные натурных наблюдений. Исследования показали, что такие наблю-

дения на значительной территории России Гидрометеослужбой не включены в обязательные. Данные о влажности метрового слоя почво-грунтов, как правило, носят эпизодический характер и ограничены. Поэтому возникла необходимость поиска косвенных путей расчёта влажности грунтов аналитическим методом. Но такой подход требует соответствующего обоснования.

Существует несколько методов расчёта влажности грунтов по метеорологическим показателям: метод Трюка, метод А.Р. Константинова [1], метод М.И. Карлинского [2], метод А.С. Плоцкого, метод гидролого-климатических расчётов. Необходимо, чтобы аналитическая модель метода позволяла выполнять расчёты не только многолетней влажности грунта, но и за конкретные годы, учитывается глубина залегания грунтовых вод и физические свойства грунта. С учётом сформулированных критериев анализ современных наблюдений показал, что для расчётов естественной влажности грунтов наиболее перспективен метод В.С. Мезенцева [3], основанный на решении вводно-теплового баланса грунтового приземного слоя и атмосферы.

Общий вид составленного уравнения баланса имеет вид:

$$\begin{aligned} C + W_1 - W_2 + Q_1 - Q_2 = \\ = Z + (Y_2 - Y_1) + (G_2 - G_1) + (S_2 - S_1) + (P_2 - P_1), \end{aligned} \quad (1)$$

где C - конденсация водяных паров; Z - суммарное испарение; Y_1 и Y_2 - приток и отток поверхностных вод; G_1 и G_2 - приток и отток почвенной влаги в расчётном слое h_p ; S_1 и S_2 - приток и отток грунтовой воды в расчётном слое $h_{ГВ} - h_p$; P_1 и P_2 - приток и отток грунтовых вод; W_1 и W_2 - влажность грунта в слое h_p на начало и конец расчётного периода времени; Q_1 и Q_2 - влагозапасы в слое h_p на начало и конец расчётного периода времени.

После преобразования уравнение (1), записывается в виде

$$KX + W_1 - W_2 + P_2 - P_1 = Z + Y . \quad (2)$$

Уравнение (2) в левой части содержит приходные элементы, в сумме представляющие водные ресурсы участка. В правой части представлены две компоненты (испарение Z и сток Y), меняя которые, можно своевременно регулировать изменение влажности грунтов в земляном полотне. Основной расходной статьёй уравнения (2) является испарение, зависящее от радиационного и турбулентного теплообмена земной поверхности с атмосферой. Это обстоятельство обуславливает необходимость рассматривать влагообмен грунтовой поверхности с атмосферой в единстве с процессом теплообмена.

Тогда теплообмен грунтовой поверхности с воздухом

$$R^+ + P^+ + B_1 - B_2 = LZ + P^- + J_i - LC , \quad (3)$$

где R^+ - радиационный баланс; P^+ - положительная составляющая турбулентного теплообмена; B_1 и B_2 - теплообмен в расчётном слое; LZ - расход тепла на испарение; P^- - расход тепла на нагревание воздуха – турбулентный теплообмен; J_i - длинноволновое излучение поверхности в ночные часы суток; LC - тепло конденсации паров воздуха на грунтовую поверхность.

Для совместного решения тепло- и влагообмена грунтового слоя с окружающей средой необходимо установить эмпирические зависимости радиационного баланса от факторов, определяющих его косвенно. Тесные связи установлены с суммами среднесуточных температур воздуха от 0 до 10 и суммой летних среднемесячных температур воздуха.

Для определения значений максимально возможного испарения за i среднегодовые промежутки времени Z_{mi} может быть использована зависимость

$$Z_{mi} = \frac{d_i}{\sum d_i} Z_{mr} , \quad (4)$$

где d_i - средний за месяц или декаду дефицит влажности воздуха; $\sum d_i$ - средняя сумма этих дефицитов.

Совместное решение балансовых уравнение (2) и (4) после преобразований даёт уравнение водно-теплового баланса вида

$$\frac{r}{r+1} \cdot \frac{Z_{m,i}}{LW_T} \cdot W_{cp,j}^r + W_{cp,j} = \frac{r}{r+1} \cdot \frac{KX_i - m_i + g_i}{LW_T} + W_{1,i} \quad (5)$$

где m_i - дополнительное снижение влажности грунтового слоя за счёт увеличения поверхностного стока после заблаговременного проведения подготовительных инженерных сооружений; W_T - относительная влажность грунта в долях от влажности предела текучести; L - коэффициент, зависящий от типа грунта, равен: для супесей пылеватых и суглинков легких пылеватых 0,63, суглинков тяжёлых пылеватых 0,68, 0,74; r - параметр, характеризующий вводно-физические свойства грунта (составляет для супесей, суглинков легких 1,5, суглинков тяжёлых, глин – 2,5); $W_{cp,i}$ - средняя влажность грунта; $W_{1,i}$ - влажность грунта от начала i - расчётного периода.

Изученное рекуррентное уравнение позволяет рассчитать среднюю влажность грунта W_{cp} - в пределах деятельного слоя за любой i - расчётный период времени (квартал, месяц, декаду). Решение находится методом последовательных приближений по известной сумме атмосферных осадков и среднемесячных температур воздуха более 0°C $\sum_{t>0}^{cm}$ и дефиците влажности воздуха $\sum d_i$. Оценка точности расчётов по предложенным формулам показала, что максимальная ошибка не превышает пределы доверительного интервала с надёжностью $P=95\%$.

Влажность грунтов в пределах деятельного слоя до 2-х метров определяется атмосферными осадками KX_i и максимально возможным испарением Z_{mi} за расчётные интервалы времени. Ошибка в назначении относительной влажности грунта на начало первого расчётного периода $W_{1,i}$ прак-

тически исчезает через 4-5 шагов расчёта. Поэтому при формировании хронологического ряда среднемесячной влажности грунтов аналитическим методом за предшествующие 5-6 лет в расчётный период необходимо дополнительно включать ещё один год. Влажность грунта $w_{1,i}$ на начало первого расчётного периода следует принимать равной среднему многолетнему значению на начало летнего периода. Такой подход повышает качество ретроспективной информации о влажностном режиме земляного полотна в предшествующие моменты времени.

В случае отсутствия исходных данных для расчёта влажностного режима земляного полотна для оценки степени увлажнения грунтов в отдельные периоды предлагаем использовать коэффициент увлажнения района возведения земляного полотна, представляющий отношение годовых сумм атмосферных осадков к максимально возможному испарению

$$U_x = \frac{KX_r}{Z_{mr}}, \quad (6)$$

где U_x - интегральный показатель увлажнения территории, коэффициент увлажнения; KX_r и Z_{mr} - соответственно сумма атмосферных осадков и максимально возможное испарение за год.

Предложенный показатель увлажненности территории использован для дорожно-климатического районирования территории России. Выполненный нами анализ взаимосвязи значений коэффициента увлажнения и среднемесячной влажности различных видов грунтов показал, что имеет место тесная корреляционная связь между этими величинами (коэффициент корреляции 0,90). Зависимость среднемесячной влажности супеси легкой и суглинка тяжелого от коэффициента увлажнения приведена на рис. 1 и 2. Выполненные исследования показывают, что использование величины U_x для оценки увлажненности земляного полотна правомерно. Полученное корреляционное уравнение имеет вид

$$W_{cpi} = W_T(a_i U_x + b_i), \quad (7)$$

где a_i и b_i - коэффициенты уравнения регрессии, зависят от типа грунта и типа года (табл. 1).

Для повышения надёжности принимаемых решений представляется целесообразным прогнозировать влажность грунтов в пределах доверительного интервала. Среднемесячная влажность почво-грунта в летний период имеет нормальный закон распределения (рис. 1,2). Следовательно, среднемесячную влажность грунтов земляного полотна в тёплый период года можно рассчитать по формуле

$$W_{p,i} = W_{cp,i} (1 \pm \Phi_p C_{V,i}), \quad (8)$$

где $W_{cp,i}$ - среднемесячная влажность грунта в i -й месяц; Φ_p - нормированное отклонение; $C_{V,i}$ - коэффициент вариации относительной влажности грунта в i -й месяц летнего сезона.

Коэффициент вариации влажности грунта имеет значение, равное 0,1. Однако исследованиям В.М. Сиденко [4], Н.Н. Ермолаева [5] и др. учёных установлено, что при увеличении относительной влажности коэффициент вариации имеет тенденцию к снижению своего значения.

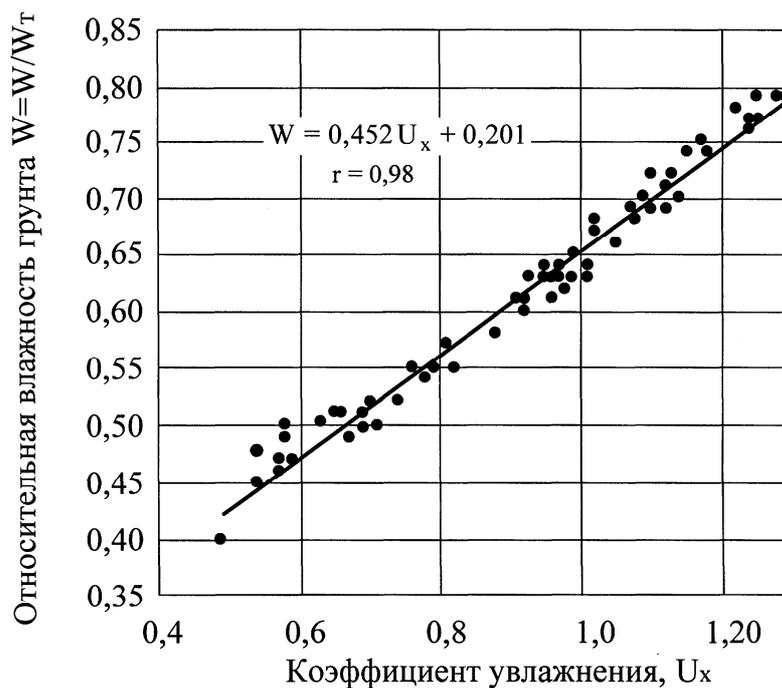


Рисунок 1 – Зависимость влажности супеси легкой от коэффициента увлажнения (май)

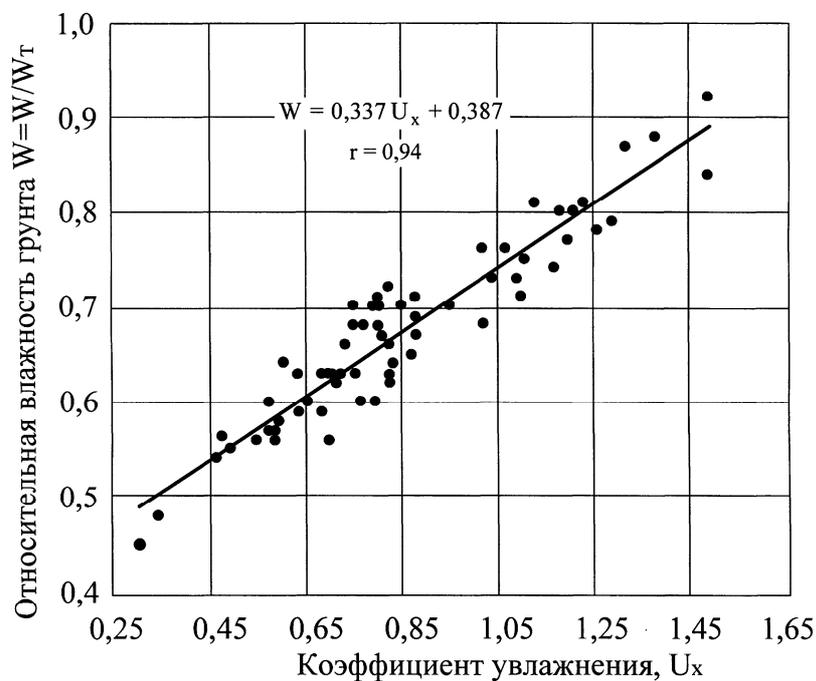


Рисунок 2 – Зависимость влажности суглинка тяжелого от коэффициента увлажнения (май)

Таблица 1 – Значения коэффициентов уравнения (7)

Вид грунта	Месяц i	a	b	Коэффициент корреляции r	Ошибка
Супесь пылеватая	V	0,451	0,199	0,990	0,020
	VI	0,470	0,110	0,994	0,015
	VII	0,397	0,140	0,993	0,016
	VIII	0,333	0,191	0,986	0,023
	IX	0,328	0,203	0,986	0,023
Суглинок легкий пылеватый	V	0,450	0,246	0,844	0,077
	VI	0,395	0,211	0,857	0,074
	VII	0,341	0,206	0,860	0,075
	VIII	0,296	0,234	0,814	0,083
	IX	0,291	0,250	0,816	0,083
Суглинок тяжёлый пылеватый	V	0,336	0,387	0,947	0,045
	VI	0,269	0,399	0,955	0,042
	VII	0,242	0,393	0,915	0,057
	VIII	0,242	0,383	0,899	0,062
	IX	0,246	0,383	0,902	0,061
Глина пылеватая	V	0,336	0,430	0,937	0,049
	VI	0,294	0,435	0,955	0,041
	VII	0,262	0,431	0,914	0,057
	VIII	0,248	0,437	0,874	0,069
	IX	0,266	0,418	0,902	0,061

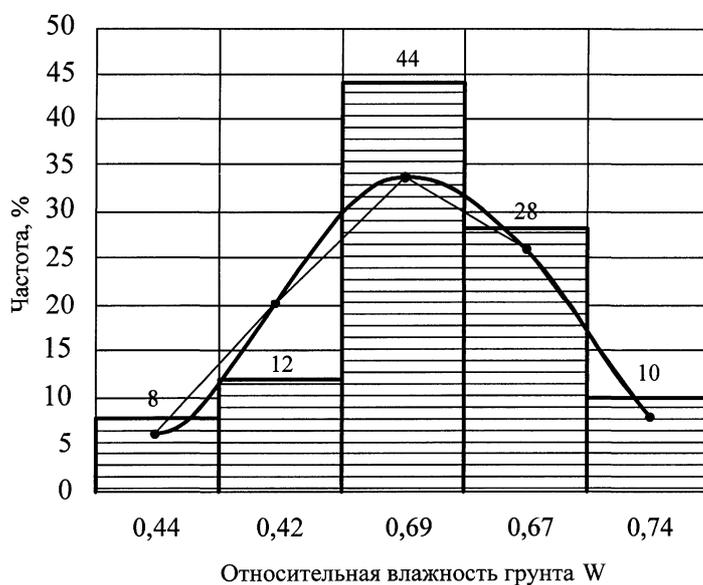


Рисунок 3 – Гистограмма и теоретическая кривая распределения относительной влажности суглинка легкого пылеватого в мае (г. Израель)

Таблица 2 – Проверка гипотезы нормального распределения влажности грунтов

Агрометеостанция	Координаты, град.		Критерий согласия			
	широта	долгота	Пирсона		Романовского	
			Опытное	Теоретическое	Опытное	Теоретическое
Саратов	51,6	46	4,37	5,9	1,18	3
Волгоград	52,6	38,5	1,15	5,9	-0,42	3
Пенза Терновка	58,1	45	18,9	5,9	8,64	3
Сосногорск	68,5	63	8,64	5,9	3,32	3
Краснодар Круглик	45,03	39,15	3,73	5,9	0,86	3
Ростов-на-Дону	47,3	39,8	2,58	5,9	0,29	3
Ижевск	67,5	64	4,83	5,9	1,41	3
Нижний Новгород - Стригино	56,2	43,8	6,62	5,9	2,31	3
Калуга	54,6	36,4	4,28	5,9	1,14	3
Вуктыл	61,7	50,8	5,28	5,9	1,64	3
Владимир	56,1	40,3	4,83	5,9	1,42	3
Рязань	54,6	39,7	4,32	5,9	1,18	3

С целью обоснованного назначения коэффициента вариации влажности почво-грунтов выполнены исследования влияния математического ожидания влажности грунтов естественного залегания на показатель её изменчивости C_V (рис. 4) [6,7]. Выполненные исследования позволили установить зависимость коэффициента вариации C_V влажности грунтов от её математического ожидания W_{cp} (при изменении от $0,38W_{cp}$ до $0,84W_{cp}$)

$$C_V = 0,5104W_{cp}^2 - 0,9046W_{cp} + 0,4883. \quad (9)$$

Предложенная математическая модель влажностного режима грунтов земляного полотна позволяет определить фактическую или расчётную (с заданным уровнем надёжности) влажность любого типа грунта естественного увлажнения в пределах деятельного слоя 2,0 м по данным наблюдений за температурой и дефицитом влажности воздуха, приведенных в источниках по климату.

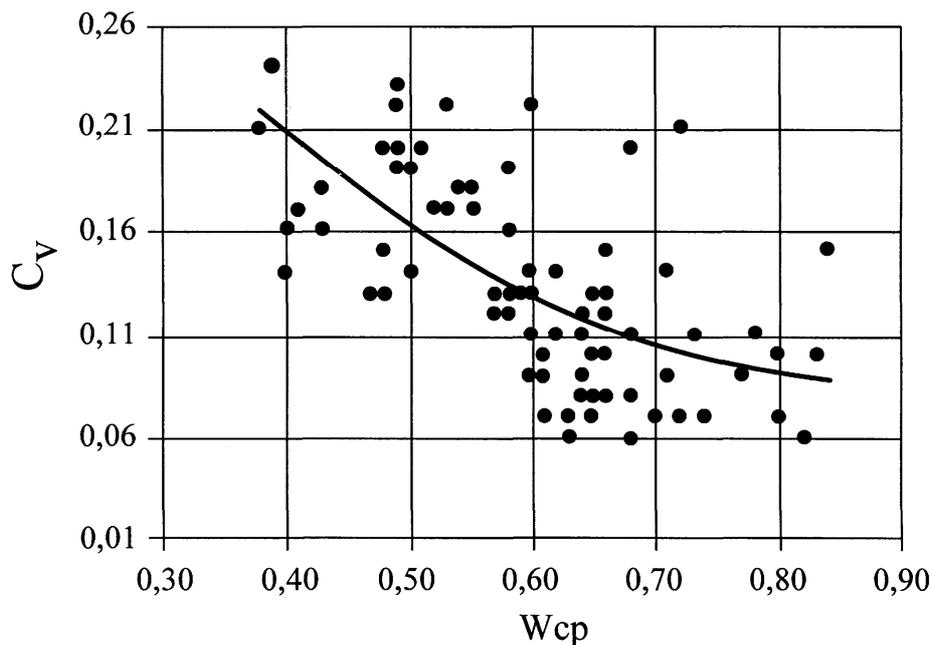


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента вариации влажности грунтов от её математического ожидания

Выводы:

- выполненный анализ статистической структуры устойчивости влажности грунта и коэффициента увлажнения позволяет сделать вывод о том, что в ней присутствует скрытая периодическая закономерность;
- по результатам статистической текстуры изменчивости увлажненности исследуемого района подтверждается возможность применения линейного экстраполирования применительно к прогнозу влажности грунта;
- предложенная математическая модель влажностного режима грунтов земляного полотна позволяет определить фактическую или расчётную (с заданным уровнем надёжности) влажность любого типа грунта естественного увлажнения в пределах деятельного слоя 2,0 м по данным наблюдений за температурой и дефицитом влажности воздуха;
- результаты прогнозов влажности грунта на один-два сезона позволяют одновременно получить информацию, необходимую для достоверно-

го планирования технологических мероприятий по сооружению земляного полотна и по нормализации водно-теплого режима.

Список литературы:

1. Константинов, А.Р. Испарение в природе [Текст] / А.Р. Константинов. – Л.: ГИМИЗ, 1968. – 59 с.
2. Карлинский, М.И. К вопросу о методике определения расчётной влажности глинистых грунтов в годовом цикле: инструктивно-методические указания [Текст] / М.И. Карлинский. – М., 1969. - №6. – 26 с.
3. Мезенцев, В.С. Расчёты водного баланса [Текст] / В.С. Мезенцев. – Омск: ОмСХИ, 1976. – 74 с.
4. Сиденко, В.М. Стандартизация и контроль качества в дорожном строительстве [Текст] / В.М. Сиденко. – Киев: Высшая школа, 1985. – 256 с.
5. Ермолаев, Н.Н. Надёжность оснований сооружений [Текст] / Н.Н. Ермолаев, В.В. Михеев. – Л.: Стройиздат, 1976. – 152 с.
6. Курьянов, В.К. Математическая модель неустановившегося потока воды в дренирующем слое дорожной одежды с учетом фильтрации в капиллярной зоне [Текст] / В.К. Курьянов, А.В. Скрыпников, Ф.А. Кириллов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки, 2005. – № 2. – С. 82-85.
7. Анализ функционирования системы «водитель-автомобиль-дорога-среда» в лесном комплексе [Текст] / А.В. Скрыпников, О.В. Свиридов, Р.Н. Котляров, П.И. Морозов // Информационные технологии моделирования и управления, 2010. – № 3 (62). – С. 312-318.