

УДК 630.383

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Кондрашова Е.В.

ГОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж,  
e-mail: rivelenasoul@mail.ru

Определены пути расчёта влажности грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог аналитическим методом. Полученное рекуррентное уравнение позволяет рассчитать среднюю влажность грунта в пределах деятельного слоя за любой расчётный период времени (квартал, месяц, декада). Решение находится методом последовательных приближений по известной сумме атмосферных осадков и среднемесячных температур воздуха более 0 °С и дефиците влажности воздуха.

**Ключевые слова:** лесовозная автомобильная дорога, влажность грунта, земляное полотно, влагообмен

**Введение.** Эффективное функционирование и устойчивое развитие сети лесовозных автомобильных дорог являются необходимыми условиями экономического роста, повышения конкурентоспособности и снижения издержек товаропроизводителей, улучшения условий жизни населения, выравнивания уровня социально-экономического развития регионов России.

Одной из основных причин неудовлетворительного состояния сети лесовозных автомобильных дорог [1] являются ускоренное старение и деградация дорожных конструкций в условиях существенного несоответствия темпов дорожных работ по модернизации дорог и роста транспортных нагрузок на дорожную сеть. Наибольшие объемы работ по строительству и реконструкции дорог были выполнены в период 60 – 70-х годов прошлого столетия. В соответствии с действовавшими тогда строительными нормами дороги рассчитывались на пропуск выпускавшихся отечественной промышленностью автомобилей с нагрузками 6–10 т на ось. Дорожные одежды лесовозных автомобильных дорог устраивались с широким применением низкопрочных местных материалов, земляное полотно дорог зачастую возводилось из слабых гумусированных грунтов придорожной полосы. С учетом этих факторов и исходя из тридцатилетней

продолжительности жизненного цикла дорог, их прочностные характеристики не соответствуют современным требованиям, что приводит к их ускоренному износу при пропуске эксплуатируемых в настоящее время транспортных средств.

Земляное полотно должно быть прочным, устойчивым и долговечным, требующим минимума расходов на его устройство, содержание и ремонт и обеспечивающим возможность широкой механизации работ.

Воздействие на дорожное покрытие со стороны нижележащих слоёв, вызываемое нарушениями водно-теплового режима работы всей конструкции, приводит к разрушению всей дорожной одежды.

### Цель исследования

Важным фактором, определяющим организацию и технологию производства работ по строительству или ремонту лесовозных автомобильных дорог в сложных грунтово-геологических условиях, является влажность грунтов. Для повышения долговечности и прочности дорожной одежды необходимо разработать модель прогноза влажности грунта в основании земляного полотна.

### Методика исследований

Для подготовки исходного хронологического ряда среднемесячной естественной

влажности грунтов на планируемых участках возведения земляного полотна лесовозных автомобильных дорог требуются натурные наблюдения. Анализ современных исследований показал, что для расчётов естественной влажности грунтов наиболее перспективен метод гидролого-климатических расчётов, основанный на решении уравнений водно-теплового баланса грунтового слоя и атмосферы.

На рис. 1 представлена расчётная схема влагообмена грунтового слоя толщиной

$h_p$  с атмосферой и грунтовыми водами, на которой искомое распределение влажности грунта в слое аэрации от уровня грунтовой воды до поверхности показано эпюрой. В соответствии с взаимодействием конденсационных и капиллярных сил влажность грунта в зоне аэрации определяется следующим образом: от  $W_{пв}$  полной влагоёмкости до  $W_{уб}$  наименьшей влагоёмкости на уровне капиллярной каймы  $h_{кк}$  и до  $W_A$  влажности грунта у дневной влажности.

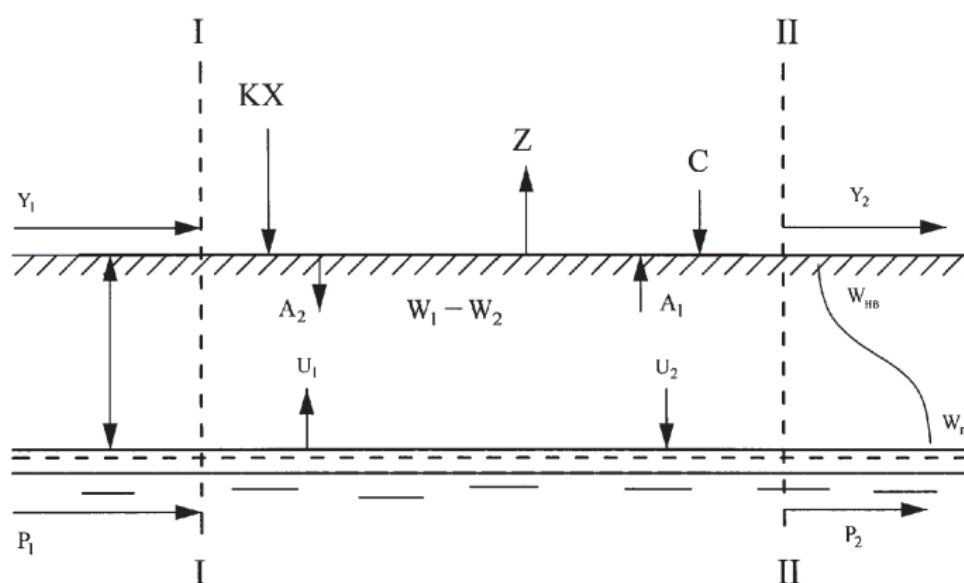


Рис. 1. Схема влагообмена расчётного грунтового слоя с атмосферой

Общий вид составленного уравнения баланса имеет вид:

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

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

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

где  $Y = (Y_2 - Y_1) + (P_2 - P_1)$ .

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 одновременно регулировать изменение влажности ( $W_1 - W_2$ ) 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 (рис. 2).

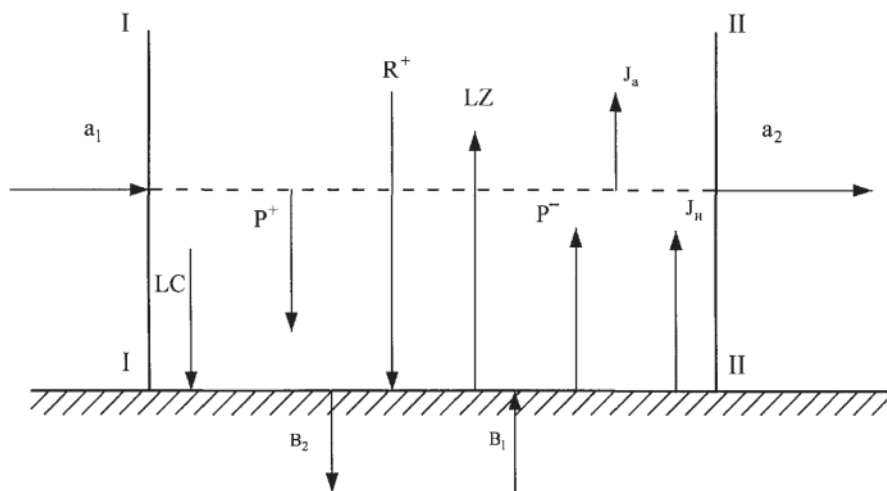


Рис. 2. Расчётная схема теплообмена грунтовой поверхности с атмосферой

На основе закона сохранения энергии с воздухом записывается уравнение теплообмен грунтовой поверхности вида

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

где  $R^+$  – радиационный баланс (разность между поглощенной коротковолновой радиацией Солнца и балансом длинноволнового излучения);  $P^+$  – положительная составляющая турбулентного теплообмена (направленная вниз вертикальная составляющая потока тепла в воздухе);  $B_1$  и  $B_2$  – теплообмен в расчётном слое;  $LZ$  – расход тепла на испарение;  $P^-$  – расход тепла на нагревание воздуха – турбулентный теплообмен;  $J_n$  – длинноволновое излучение поверхности в ночные часы суток;  $LC$  – тепло конденсации паров воздуха на грунтовую поверхность.

В более компактном виде уравнение (3) выглядит

$$LZ_m = R^+ + P^+, \quad (4)$$

где  $Z_m$  – максимально возможное испарение влаги с грунтовой поверхности, равное количеству влаги, которое могло бы испариться при расходе на нагревание всех тепловых ресурсов (представляет собой верхний

предел испарения);  $L$  – скрытая теплота испарения влаги.

$$P^+ = a_1 - a_2 - J_a,$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – приток и отток тепла с участка в связи с движением воздуха; отдача части тепла в атмосферу за счёт ветровых потоков воздуха.

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 расчётов  $Z_{mr}$  в конкретные годы рекомендуется корреляционная зависимость от суммы среднемесячных температур

$$Z_{mr} = 5,88 \sum t_{>0}^{cm} + 260, \quad (5)$$

где  $Z_{mr}$  – максимально возможное испарение в год.

Уравнение (5) применимо для расчётов максимального испарения грунтовой поверхности под естественным растительным покровом.

Поглощенная солнечная радиация, определяемая альбедо поверхности, для расчищенной и естественной грунтовых поверхностей, преобразована в следующую зависимость:

Для суглинистых грунтов и глин

$$Z_{mr} = 6,17 \sum t_{>0}^{cm} + 265. \quad (6)$$

Для супесчаных грунтов и песков

$$Z_{mr} = 4,99 \sum t_{>0}^{cm} + 243. \quad (7)$$

$$\frac{r}{r+1} \cdot \frac{Z_{m,i}}{LW_T} \cdot W_{cp,j}^r + W_{cp,j} = \frac{r}{r+1} \cdot \frac{KX_i - m_i + g_i}{LW_T} + W_{1,i}, \quad (9)$$

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 водно-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.

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

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

$$Z_{mi} = \frac{d_i}{\sum d_i} Z_{mr}, \quad (8)$$

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

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

ного 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.

Для оценки степени увлажнения грунтов в отдельные годы определялся коэффициент увлажнения района возведения земляного полотна, представляющий отношение годовых сумм атмосферных осадков к максимально-возможному испарению

$$U_x = \frac{KX_T}{Z_{mr}}, \quad (10)$$

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

Для повышения надёжности принимаемых решений представляется целесообразным прогнозировать влажность грунтов в пределах доверительного интервала

$$W_{p,i} = W_{cp,i} \left( 1 \pm \Phi_p C_{v,i} \right), \quad (11)$$

где  $\Phi_p$  – нормированное отклонение;  $C_{v,i}$  – коэффициент вариации относительной

влажности грунта в  $i$ -й месяц сезона возведения.

Для изучения многолетних изменений влажности грунта и коэффициента увлажнения был проведён корреляционно-спектральный анализ. Проверялись 3 гипотезы: об отсутствии тренда в значениях коэффициента увлажнения и влажности грунта, о стационарности и нормальности распределения случайной компоненты. Для выявления цикличности рассмотрены закономерности изменения корреляционной функции временного ряда

$$R_x(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+\tau} - \bar{x}_{i+\tau})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \bar{x}_1)^2 (x_{i+\tau} - \bar{x}_{i+\tau})}}, \quad (12)$$

где  $x_i$  –  $i$ -е значение ряда;  $\bar{x}_1$  – среднее многолетнее значение ряда от первого до  $(n - \tau)$ -го члена;  $n$  – общее число членов ряда;  $\bar{x}_{i+\tau}$  – среднее многолетнее значение ряда от  $(i + \tau)$ -го ряда до  $n$ -го члена для всех целочисленных значений  $\tau$  до  $\tau = 20$ .

Оправдываемость прогнозов составляет 84–100 %.

### Результаты и их обсуждение

Полученное 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  $0^\circ\text{C} \sum_{t>0} t_{>0}^{cm}$  и дефиците влажности воздуха  $\Sigma d_i$ . Оценка точности расчётов по предложенным формулам показала, что максимальная ошибка не превышает пределы

доверительного интервала с надёжностью  $P = 95\%$ .

**Вывод.** Результаты прогнозов дают возможность заблаговременно получить информацию, необходимую для оценки возможности сооружения насыпи из анализируемого грунта, проектирования рациональной технологии, проведения организационно-технологических мероприятий по нормализации водно-теплового режима и долговечности конструктивных элементов лесовозных автомобильных дорог.

### Список литературы

1. Курьянов В.К. Повышение эффективности обследования автомобильных дорог в районах лесозаготовок / В.К. Курьянов, Е.В. Кондрашова, Ю.В. Лобанов. – М.: ИД «Академия Естествознания», 2010. – 130 с.
2. Кондрашова Е.В. Технология проектирования лесовозных автомобильных дорог / Е.В. Кондрашова, Ю.В. Лобанов, А.В. Тарарыков // Бюллетень транспортной информации (БТИ). Информационно-практический журнал. – 2008. – №12 (162). – С. 29–32.

### Рецензенты:

Кравченко Е.А., д.т.н., профессор кафедры «Организация перевозок и дорожного движения» Кубанского государственного технологического университета, Краснодар;

Баженов С.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автомобили и тракторы» Липецкого государственного технического университета, Липецк;

Подольский В.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительства автомобильных дорог ГОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», Воронеж;

Чижов М.И., д.т.н., профессор кафедры автоматизации оборудования машиностроительных предприятий ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж.

## FORECASTING OF HUMIDITY FOR THE SOIL BASIS ON ROADS IN AREAS OF TIMBER CUTTINGS

**Kondraschova E.V.**

*Voronezh State Academy of Forestry Engineering and Technologies, Voronezh,  
e-mail: rivelenasoul@mail.ru*

The article studies the ways of calculation of soil basis humidity for roads by an analytical method. The received recurrent equation allows to calculate average humidity of a ground within an active layer for any settlement period of time (quarter, month, decade). The decision is a method of consecutive rapprochements on the known sum of an atmospheric precipitation and monthly average temperatures of air more 0°C and deficiency of humidity of air.

**Keywords: a highway, humidity of a ground, an earthen cloth, moisture exchange**