

УДК 625.814

РАСЧЁТ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Маркуц В.М.

Тюмень, e-mail: vmarkuc@yandex.ru

Разработан метод прогнозирования влажности грунтов на основе решения нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности. При этом коэффициент переноса влаги был заменён более надёжными, знакомыми и доступными параметрами. В настоящей работе даны решения изотермического увлажнения и послойный расчёт влажности грунтов активной зоны в зависимости от расчетной схемы: увлажнение только сверху, только снизу, двухстороннее увлажнение при глубоком и близком залегании грунтовых вод, для защищенного и незащищенного грунта, для условий двухстороннего увлажнения при меняющемся положении подземных вод. С использованием метода гидролого-климатических расчётов В.С. Мезенцева и принципа суперпозиции получены уравнения для прогнозирования средней влажности грунта в пределах активной зоны во внутригодовом цикле.

Ключевые слова: влажность, расчёт влажности, уравнение теплопроводности, активная зона

CALCULATION OF SOIL MOISTURE ACTIVE ZONE

Markuts V.M.

Tyumen, e-mail: vmarkuc@yandex.ru

Developed a method for prognostication soil moisture based on the solutions of the nonlinear differential equation conduction of heat. The coefficient of moisture transfer was replaced by a more reliable, familiar and available options. In this paper we give solutions isothermal humidification and stratified soil moisture calculation of the core, depending on the design scheme: moisturizing only from above, but from below, two-way hydration during deep and shallow ground water for protected and unprotected soil conditions for two-way humidification at the changing position groundwater. Using the method of calculation of hydrological and climatic V.S. Mesentsev and the superposition principle to derive equations to predict the average moisture content of the soil within the active zone during the yearly cycle.

Keywords: moisture, humidity calculation, equation conduction of heat, active zone

Активной зоной называют глубину, где практически затухают напряжения от внешних нагрузок. На этой глубине величина сжатия грунтового слоя чрезвычайно мала. Для оценки прочности и устойчивости земляного полотна, определения межремонтных сроков и параметров мерзлотного режима необходим прогноз влажности грунтов. Поскольку влажность сама по себе является феноменологической характеристикой, количественная её оценка традиционно основана на феноменологической теории тепло- и массообмена с использованием методов классической термодинамики путем введения коэффициентов переноса влаги.

Однако плохая воспроизводимость результатов определения коэффициентов переноса влаги, наличие субъективизма, присущее всем упрощённым методикам, обусловило разработку более надёжных способов расчёта и прогнозирования влажности грунтов активной зоны земляного полотна инженерных сооружений. Одним из таких методов явился метод, основанный на решении нелинейного дифференциального уравнения изотермического переноса влаги, в результате чего коэффициент переноса влаги был заменён более надёжными, знакомыми и доступными параметрами.

Общие положения

Сопряженное уравнение диффузии влаги с законом сохранения энергии (уравнение неразрывности) записывается в виде [2]:

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} \right)_x = \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)_x. \quad (1)$$

Поток влаги в грунт после инфильтрации осадков или в результате капиллярного поднятия определяется из соотношения:

$$q = K_n \frac{\partial \mu}{\partial x}, \quad (2)$$

где K_n – коэффициент влагопроводности $\frac{\partial \mu}{\partial x}$ – градиент потенциала влаги.

Из (1) и (2) определяем:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_n \frac{\partial \mu}{\partial x} \right].$$

Градиент потенциала, выраженный через градиент влажности:

$$\frac{\partial \mu}{\partial x} = \frac{\partial \mu}{\partial W} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right);$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_n \frac{\partial \mu}{\partial W} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] - \text{есть урав-}$$

нение миграции влаги под действием градиента влажности и градиента потенциала. Действием силы тяжести пренебрегаем, так как в ненасыщенных почво-грунтах супесчаных и суглинистых миграция влаги в изотермических условиях в большей степени зависит от потенциала влаги, чем от действия силы тяжести и площади инфильтрации.

Потенциал влаги и коэффициент влажпроводности определяется как функция влагосодержания:

$$\mu = GW^\xi \text{ и } K_n = BW^b.$$

$$\text{Отсюда: } \frac{\partial \mu}{\partial W} = G\xi W^{\xi-1} \text{ и}$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[BW^b G\xi W^{\xi-1} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right) \right].$$

Обозначим $BG\xi = A$, $b + \xi - 1 = \alpha$.

Согласно [2] параметр ξ обычно равен -1 или -2 , может иметь значение 1 или 2 , тогда α может иметь значение 0 , -1 или -2 . Как показали опыты, наиболее вероятное значение α – это -1 .

Тогда

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[AW^\alpha \frac{\partial W}{\partial x} \right], \quad (3)$$

$$u(x, \tau) = \left(\frac{C_1 C_2}{\lambda} + A \frac{C_2}{2} \tau \right) \text{Sech}^2 \left[\frac{C_3 - x}{2} \sqrt{C_2} \right], \quad (6)$$

где x и τ – пространственно-временные координаты, а постоянные интегрирования C_1 , C_2 , C_3 , A и λ определяются из начальных и граничных условий.

Некоторые частные решения задачи изотермического увлажнения

Хотя полученное решение и не является вполне строгим, с его помощью оказалось возможным решить ряд практических задач. В частности, удалось получить более общее решение задачи увлажнения снизу от уровня грунтовых вод. При решении задачи увлажнения сверху это уравнение явилось основой эффективного использования метода гидролого-климатических расчетов В.С. Мезенцева [6]. Предварительные расчеты показали применимость его при ре-

где A и α константы, зависящие от вида грунта.

$$K_n \frac{\partial \mu}{\partial W} = AW^\alpha \text{ есть } D_k - \text{обобщенный}$$

коэффициент диффузии (коэффициент диффузности). Уравнение (3) не совсем верно отражает реальные процессы миграции влаги, когда возможно движение влаги против градиента влажности, но тем не менее с его помощью можно получить качественную картину влажностного режима и оценить ожидаемое значение величины влажности грунта земляного полотна.

Частное решение уравнения диффузивности

Если обобщенный коэффициент проводимости D_k представить в виде функции

$$D_k = Au^\alpha, \quad (4)$$

то уравнение (4) приводится к виду

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[Au^\alpha \frac{\partial u}{\partial x} \right], \quad (5)$$

легко решаемое классическим методом разделения переменных.

Здесь A и α параметры, характеризующие проводящие свойства среды (грунта). После дифференцирования уравнения (5) и последующих преобразований при $\alpha = -1$ получено решение уравнения классическими методами математической физики [5]:

шени и целого ряда других вопросов, например, температурного поля и вторичной консолидации слабых оснований, распределения по глубине напряжений, удельной поверхности почвогрунтов и содержания солей, моделирование движения транспортных потоков на автомобильных дорогах.

В настоящей работе даны решения изотермического увлажнения в зависимости от расчетной схемы: увлажнение только сверху, только снизу, двухстороннее увлажнение при глубоком и близком залегании грунтовых вод, для защищенного и незащищенного грунта. Влагонакопление происходит, главным образом, за счет диффузии влаги по порам [10].

Для закрытых грунтовых систем, у которых сверху, снизу или с боков имеются

паро- и влагонепроницаемые слои, характерна эпюра распределения влаги, когда постоянная интегрирования C_3 соответствует глубине максимальной конденсации водяных паров. В зависимости от климатических условий эта величина может быть от 20 до 60 см. Верхние слои незащищенного грунта увлажняются осадками, параметр $C_3 = 0$.

При увлажнении снизу влажность на горизонте грунтовых вод изменяется в соответствии с колебаниями его положения относительно поверхности земли и равна

$$\omega(x, \tau) = \frac{C_1}{\lambda} \frac{C_2}{2} + A \frac{C_2}{2} \tau \cdot \text{Sech}^2 \left[\frac{C_3 - x}{2} \sqrt{C_2} \right]. \quad (7)$$

Формула (7) может быть модифицирована в зависимости от начальных и граничных условий, соответствующих той или иной схеме увлажнения земляного полотна.

$$\omega(x, \tau) = \omega(x, 0) + \left\{ [\omega(0, \tau) - \omega(0, 0)] \frac{\tau}{\tau_{\text{вл}}} \right\} \text{Sech}^2 \left[\frac{C_3 - x}{h_k} \text{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_1} \right], \quad (8)$$

где

$$\varepsilon_1 = \frac{\omega_n - \omega(h_k, 0)}{\omega(0, \tau) - \omega(0, 0)}. \quad (9)$$

При $\varepsilon \leq 0$ $\text{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_1} = 5,3$.

Начальное распределение влажности по глубине может быть постоянным или задано в виде функции $\omega(x, 0)$. Объемная влажность $\omega(h_k, 0)$ на глубине равной h_k от поверхности зависит от условий увлажнения. Влажность на поверхности может прогнозироваться регрессионными уравнениями [4], либо другими методами, например [9].

Если принять, что начальная влажность по глубине h_k равна оптимальной, а влажность на поверхности может достигнуть полной влагоёмкости, тогда

$$\varepsilon_1 = \frac{\omega_{n(\text{опт})} - \omega_{\text{опт}}}{\omega_{ns(\text{опт})} - \omega_{\text{опт}}}$$

$\omega_{n(\text{опт})}$ – наименьшая влагоёмкость, соответствующая максимальному уплотнению при оптимальной влажности.

Длительность периода влагонакопления ($\tau_{\text{вл}}$) принимается равной с начала осеннего влагонакопления и до конца весеннего периода, то есть:

$$\tau_{\text{вл}} = \tau_{\text{ос}} + \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{вес}}. \quad (3)$$

В период промерзания и в зимний период влагонакопление происходит за счет увлажнения снизу от уровня грунтовых вод.

$$\omega(H - x, \tau) = \omega(H - x, 0) + \left\{ [\omega_{\text{пв}} - \omega(H, 0)] \frac{\tau}{\tau_{\text{вл}}} \right\} \text{Sech}^2 \left[\frac{H - x}{h_k} \text{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2} \right],$$

где

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_n - \omega(H - h_k, 0)}{\omega_{\text{пв}} - \omega(H, 0)}. \quad (10)$$

При этом были приняты следующие допущения: влажность грунта на уровне ка-

пиллярной каймы (h_k) равна наименьшей влагоёмкости (ω_n), а на глубине (H) залега-

ющей влагоёмкости ($\omega_{\text{пв}}$) при длительно стоящих грунтовых водах. В соответствии с положениями В.С. Мезенцева и А.А. Роде на уровне капиллярной каймы влажность грунта принимается равной наименьшей влагоёмкости ω_n [6, 8].

Расчёт влажности грунтов земляного полотна влагонакопления в условиях изотермического увлажнения в расчётный период

Из (6), заменяя $u(x, \tau)$ на $\omega(x, \tau)$, получаем для расчёта влажности:

С учетом этого в условиях одностороннего изотермического увлажнения сверху получено решение:

ния подземных вод равна полной влагоёмкости ($\omega_{пв}$) [6, 8].

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_n - \omega_{опт}}{\omega_{пв}(x=H) - \omega(x_n=H)}$$

В условиях двухстороннего увлажнения при меняющемся положении подземных вод для определения влажности грунта с учётом принципа суперпозиции получено решение:

$$\begin{aligned} \omega(x, \tau) = & \omega(x, 0) + \left\{ [\omega(0, \tau) - \omega(0, 0)] \frac{\tau}{\tau_{вл}} \right\} \operatorname{Sech}^2 \left[\frac{C_3 - x}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_1} \right] + \\ & + \omega(H - x, 0) + \left\{ [\omega_{пв} - \omega(H, 0)] \frac{\tau}{\tau_{вл}} \right\} \operatorname{Sech}^2 \left[\frac{H - x}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом x принимает значения от нуля до z , а $H - x$ от z до H . Величина z определяется подбором путём приравнивания обоих членов правой части уравнения (11) друг другу.

При длительно стоящих грунтовых водах

$$\frac{\tau}{\tau_{вл}} = 1 \text{ и}$$

$$\omega(H - x, \tau) = \omega(H - x, 0) + [\omega_{пв} - \omega(H, 0)] \operatorname{Sech}^2 \left[\frac{H - x}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2} \right]. \quad (12)$$

Средняя влажность грунтового массива в пределах от уровня подземных вод до верха капиллярной каймы, иначе капиллярная

влагоёмкость, при начальной влажности равной ω_0 определится из выражения:

$$\omega_{кв} = \omega_0 + \frac{\omega_{пв} - \omega_0}{h_k} \int_0^{h_k} \operatorname{Sech}^2 \left[\frac{h_k - x}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2} \right] dx.$$

После преобразований получаем:

$$\omega_{кв} = \omega_0 + (\omega_{пв} - \omega_0) \frac{\sqrt{1 - \varepsilon_2}}{\operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2}}. \quad (13)$$

Учитывая, что $\varepsilon_2 = \frac{\omega_n - \omega_0}{\omega_{пв} - \omega_0}$, при $\frac{\omega_n}{\omega_{пв}} = \frac{2}{3}$ [1, 6, 8] $\omega_{кв} = 0,73\omega_{пв}$.

Если $\omega_0 = \omega_n$ и начальная влажность $\omega_0 \rightarrow 0$, то $\omega_{кв} = 0,87\omega_{пв}$. (см. сравнительную таблицу) получаем, что у В.С. Мезенцева $\omega_{кв} = 0,80\omega_{пв}$ [6] дано только частное решение.

Сравнительные значения средней влажности грунтового массива в пределах от уровня подземных вод до верха капиллярной каймы (величины капиллярной влагоёмкости $\omega_{кв}$)

Начальное условие	Капиллярная влагоёмкость
$\omega_0 = \omega_n$	$\omega_{кв} = 0,73\omega_{пв}$
$\omega_0 \rightarrow 0$	$\omega_{кв} = 0,87\omega_{пв}$
у В.С. Мезенцева	$\omega_{кв} = 0,80\omega_{пв}$

Таким образом, мы получили более общее решение для определения средней влажности грунтового массива в пределах от уровня подземных вод до верха капиллярной каймы (величины капиллярной вла-

гоёмкости $\omega_{кв}$).

Средняя влажность грунта в пределах активной зоны h_a (зона аэрации) определяется интегрированием уравнения (11):

$$\omega_{h_a} = \omega_0 + \frac{h_k}{h_a} \frac{\tau}{\tau_{вл}} \frac{[\omega(0, \tau) - \omega_0]}{\operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_1}} \operatorname{th} \left[\frac{z}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_1} \right] + \frac{h_k}{h_a} \frac{[\omega_{нс} - \omega_0]}{\operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2}} \times \left\{ \operatorname{th} \left[\frac{H - z}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2} \right] - \operatorname{th} \left[\frac{H - h_a}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2} \right] \right\}. \quad (14)$$

Величина z определяется из выражения:

$$\frac{\tau}{\tau_{вл}} \frac{[\omega(0, \tau) - \omega_0]}{\omega_{пв} - \omega_0} = \frac{\operatorname{Sech}^2 \left[\frac{Hz}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2} \right]}{\operatorname{Sech}^2 \left[\frac{z}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_1} \right]}. \quad (15)$$

Влажность грунта на поверхности $\omega(0, \tau)$ может прогнозироваться регрессионными уравнениями [4] или любыми другими методами, например по методу профессора В.С. Мезенцева [6] или Рувинского В.И. [9]. В первом приближении $\omega(0, \tau)$ может быть принята равной (0,7 – 0,9) $\omega_{пв}$. Длительность периода влагонакопления принимается равной с начала осеннего влагонакопления и до конца весеннего периода.

Расчёт и прогнозирование влажности грунтов земляного полотна во внутригодовом цикле

Во многих случаях при решении задач прочности и надёжности дорожных конструкций возникает необходимость прогнозирования влажности грунтов во внутригодовом цикле. При решении задачи увлажнения сверху применён принцип суперпозиции с использованием метода гидролого-климатических расчётов В.С. Мезенцева [6]. Из (14):

$$\omega(x, \tau) = \frac{C_1}{\lambda} \frac{C_2}{2} + A \frac{C_2}{2} \tau \operatorname{Sech}^2 \left[\frac{C_3 - x}{2} \sqrt{C_2} \right]$$

Обозначим $\omega(x, \tau)$ как $\omega(x, i)$ и $\omega(x, i-1)$ то есть как влажность в момент времени i и $i-1$. Тогда при $x = 0$

(г/см³) на поверхности в момент времени i , равна:

$$A \frac{C_2}{2} \tau = \omega(0, i) - \omega(0, i-1).$$

$$\omega(0, i) = \frac{\omega(0, i-1) + 0,001kX_i}{0,001E_i \left[\frac{\omega(0, i-1)}{\omega_n(x)} \right]^{r-1}}.$$

По В.С. Мезенцеву [6], влажность грунта, выраженная в объёмных единицах

Тогда

$$\omega(x, i) = \omega(x, i-1) + \frac{0,001 \left[kX_i - E_i \left[\frac{\omega(x, i-1)}{\omega_n(x)} \right]^r \right]}{1 + \frac{0,001E_i}{\omega_n(x)} \left[\frac{\omega(0, i-1)}{\omega_n(x)} \right]^{r-1}} \operatorname{Sech}^2 \left[\frac{C_3 - x}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_1} \right]. \quad (16)$$

Здесь kX_p , E_i – сумма осадков и испаряемость, выраженная в (мм) за время от $i-1$ до i ; $\omega_n(x)$ – наименьшая влагоёмкость на глубине x , выраженная в объёмных единицах (г/см^3); r – параметр, характеризующий гидрофизические свойства грунтов [6]. Численное значение этого параметра можно принять равным высоте капиллярного поднятия, выраженное в метрах.

$$\omega(x, 11-3) = \omega(x, 10) + \left[\omega_{n(x=H)} - \omega_{(x=H,10)} \right] \text{Sech}^2 \left[\frac{Hx - \text{artx} \sqrt{1 - \varepsilon_2}}{h_k} \right] \quad (17)$$

Параметры C_3 , ε_1 , ε_2 определяются из начальных и граничных условий в зависимости от расчётной схемы увлажнения.

Если принять, что в начальный момент времени грунт земляного полотна был уплотнён при оптимальной влажности до соответствующей плотности и в процессе увлажнения сверху влажность на поверхности достигнет полной влагоёмкости, а на уровне капиллярной каймы наименьшей влагоёмкости, тогда:

$$\varepsilon_1 = \frac{\omega_{n(\text{опт})} - \omega_{\text{опт}}}{\omega_{\text{пв}(\text{опт})} - \omega_{\text{опт}}}$$

То же при увлажнении снизу от уровня подземных вод:

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_n - \omega(H - h_k, 0)}{\omega_{\text{пв}} - \omega(H, 0)}$$

Здесь индекс ω означает объёмную влажность; $\omega_{\text{опт}}$ – оптимальная влажность, $\omega_{n(\text{опт})}$ – наименьшая влагоёмкость, соответствующая оптимальному уплотнению; $\omega_{\text{пв}(\text{опт})}$ – полная влагоёмкость, соответствующая оптимальному уплотнению; $\omega_{\text{пв}(H)}$ – полная влагоёмкость грунта на глубине H , соответствующая уровню подземных вод; $\omega_{n(H)}$ – наименьшая влагоёмкость, соответствующая уровню подземных вод. Учитывая, что наименьшая влагоёмкость составляет 0,6 – 0,8 от полной влагоёмкости [6, 8], были установлены следующие соотношения:

$$\omega_{\text{пв}} = \frac{\gamma - \delta}{\gamma},$$

где γ – плотность частиц грунта; δ – плотность скелета грунта.

Параметр C_3 зависит от степени паро- и влагонепроницаемости покрытий. Для паро- и влагонепроницаемости покрытий,

Влажность грунта на глубине x для теплового периода года в условиях Западной Сибири и Северного Казахстана рассчитывается по формуле (16) ежемесячно, начиная с апреля ($i = 4$) по октябрь ($i = 10$) включительно.

В период промерзания и в зимний период с ноября по март включительно влагонакопление происходит за счет увлажнения снизу от уровня грунтовых вод:

изготовленных с применением органических вяжущих $C_3 = 40 - 60$ см. Для остальных покрытий $C_3 = 0 - 20$ см.

При послойном расчёте влажности грунтов используются формулы (16), (17). Исходной информацией является: климатические характеристики местности, параметры гидрофизических свойств грунтов и параметры элементов дорожных конструкций. Испаряемость для условий Западной Сибири и Северного Казахстана, как показали наши исследования, можно рассчитать по уравнениям В.С. Мезенцева [6]. Высоту капиллярного поднятия h_k и параметр r для лёгких грунтов (песок, супесь) можно принять равным 1 – 1,4, средних грунтов (суглинки лёгкие и средние) 1,4 – 2,0 и тяжёлых (суглинки тяжёлые, глины) 2 – 3 [6].

Начальное распределение влажности по глубине может быть принято равномерным или в виде функции от x . Соответственно этому рассчитывается наименьшая влагоёмкость, используя вышеприведённые зависимости. Расчёт начинают с определения зимней влажности по формуле (17). Затем по формуле (16) определяют влажность ежемесячно, начиная с 4-го, принимая $\omega(x, i-1)$ равным $\omega(x, i)$ при $i = 11 - 3$. Снова определяют зимнюю влажность, подставляя в формулу (17) $\omega(x, i-1)$, рассчитанную по уравнению формуле (16). Расчёты повторяют до тех пор пока следующее значение влажности не будет отличаться от предыдущего на заранее определённую величину, например на 0,1%. В зависимости от положения подземных вод число циклов расчёта может составлять от 6 до нескольких десятков. Поэтому при послойном расчёте влажности целесообразно использовать ЭВМ.

Алгоритмы, описанные вышеприведёнными уравнениями, реализованы на ЭВМ для различных типов грунтов при различном

уровне подземных вод для различных пунктов Западной Сибири и Северного Казахстана с 1965 г. Аналогичным образом получены

уравнения для прогнозирования средней влажности грунта в пределах активной зоны h_a (зоны аэрации) во внутригодовом цикле:

$$\begin{aligned} \omega_{h_a}^{i=10} (i) = \omega_{i-1} + \frac{h_k}{h_a} \frac{th \left[\frac{z}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1-\varepsilon_1} \right] + th \left[\frac{h_a - z}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1-\varepsilon_1} \right]}{\operatorname{artx} \sqrt{1-\varepsilon_1}} \times \\ \times \frac{0,001 \left[kX_i - E_i \left[\frac{\omega_{i-1}}{\omega_n} \right]^r \right]}{1 + \frac{0,001 E_i \left[\frac{\omega_{i-1}}{\omega_n} \right]^{r-1}}{\omega_n}}. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \omega_{h_a}^{i=3} (i) = \omega_{i-1} + \frac{h_k}{h_a} \frac{th \left[\frac{H}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1-\varepsilon_2} \right] - th \left[\frac{H - h_a}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1-\varepsilon_2} \right]}{\operatorname{artx} \sqrt{1-\varepsilon_2}} \times \\ \times \left[\omega_{\text{нв}(H)} - \omega(H, i-1) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь $i - 1$ принимается 10-й месяц года.

$$\begin{aligned} \omega(i, i) = \omega(i, i-1) + \frac{0,001 \left[kX_i - E_i \left[\frac{\omega(i, i-1)}{\omega_n(H)} \right]^r \right]}{1 + \frac{0,001 E_i \left[\frac{\omega(i, i-1)}{\omega_n(H)} \right]^{r-1}}{\omega_n(H)}} \times \\ \times \operatorname{Sech}^2 \left[\frac{z - H}{h_k} \operatorname{artx} \sqrt{1-\varepsilon_1} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

В первом приближении параметр z можно принимать равным C_3 то есть 40 – 60 см. При расчёте влажности во внутригодовом цикле вначале по формуле (20) определяют влажность на глубине H (то есть на уровне подземных вод) в 10-м месяце (в начале периода промерзания), задаваясь $\omega(H, i-1) = \omega_{\text{нв}(H)}$. Осадки и испаряемость при этом определяют для октября месяца ($i = 10$). Затем по формуле (19) определяют влажность в конце зимнего периода влагонакопления, принимая среднюю влажность в зоне h_a в 10-м месяце $\omega_{i-1} = \omega_n$. После последовательно с апреля по октябрь определяют среднюю влажность по формуле (18) до тех пор пока не будет достигнута необходимая степень сходимости.

Проведённые расчёты показали, что независимо от начальных условий (начальную влажность можно даже принимать равной нулю) через определённое количество циклов будет достигнуто квазистационарное состояние. Это позволяет рекомендовать предложенный метод для прогнозирования влажности в многолетнем цикле. Основными преимуществами этого метода являются:

- отпадает необходимость определять столь непредсказуемый и капризный коэффициент влагопроводности (диффузивности) грунтов;
- возможность применения в любой дорожно-климатической зоне, для любого типа увлажнения местности;
- простота и удобство расчётов.

Основные выводы

1. Разработан метод прогнозирования влажности грунтов на основе решения нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности. Так как в одном из частных решений использована методика В.С. Мезенцева, разработанная для грунтов открытого поля, то результаты расчётов требуют уточнения с целью учёта испарения и впитывания влаги.

2. Проведено районирование территории Западной Сибири по параметрам влажностного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд; [под ред. профессоров И.А. Золотаря, Н.А. Пузатова, В.М. Сиденко]. – М.: Транспорт, 1971. – 415 С.
2. Глобус А.М. Экспериментальная гидрофизика почв. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 355 С.
3. Маркуц В.М., Болштянский М.П. // Периоды влагонакопления и расчетный период работы новых конструкций земляного полотна нефтепромысловых дорог Западной Сибири. – РНТС ВВИИОЭНГ, сер. «Нефтепромысловое строительство». – 1980, № 5. С. 14-16.
4. Маркуц В.М. Расчет влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог Западной Сибири // Земляное полотно автомобильных дорог: тезисы докладов и сообщений УШ Всесоюзного совещания дорожников. Москва, 1981. – С. 10–11.
5. Маркуц В.М. Об одном решении уравнения теплопроводности // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог в нефтегазоносных районах Западной Сибири. – Тюмень, 1982. – С. 117-121.
6. Мезенцев В.С., Карнацевич Н.В. Увлажнённость Западно-Сибирской равнины. Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 167 с.
7. Мезенцев В.С., Карнацевич Н.В. и др. Режимы влагообеспеченности и условия гидромелиорации степного края. – М.: Колос, 1974. – 239 с.
8. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 2. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 287 с.
9. Рувинский В.Н. Оптимальные конструкции земляного полотна. – М.: Транспорт, 1982. – 168 с.
10. Embankments stabilize pooh ground fox motorway construction. Int. Constx. 1974. 13. № 5. P. 66 – 68.