

РОЗВІДУВАННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ДОРІГ ТА ПЕРЕХОДІВ ЧЕРЕЗ ВОДОТОКИ

УДК 625.731

Каськів В.І., канд. техн. наук

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТІВ У РОБОЧОМУ ШАРІ ВИСОКИХ НАСИПІВ З ВРАХУВАННЯМ ІНФІЛЬТРАЦІЇ ВОЛОГИ ДОЩІВ

Анотація. На основі теоретичних і експериментальних досліджень побудовано математичну модель розподілу вологості ґрунтів робочого шару високих насипів автомобільних доріг. Встановлено характер впливу вологи опадів на ґрунти земляного полотна, який включає в себе визначення інтенсивності дощів, величини і глибини інфільтрації, розподілу вологості при наявності неводотривкого і водотривкого дорожніх одягів.

Ключові слова: автомобільна дорога, високий насип, вологість, ґрунт, дощ, інфільтрація, математична модель, робочий шар.

УДК 625.731

Каськів В.И., канд. техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ В РАБОЧЕМ СЛОЕ ВЫСОКИХ НАСЫПЕЙ С УЧЕТОМ ИНФИЛЬТРАЦИИ ВЛАГИ ДОЖДЕЙ

Аннотация. На основании теоретических и экспериментальных исследований построена математическая модель распределения влажности ґрунтов рабочего слоя высоких насыпей автомобильных дорог. Установлен характер влияния осадков на ґрунты земляного полотна, который включает в себя определение интенсивности дождей, величины и глубины инфильтрации, распределения

влагности при наличии водопроницаемой и водонепроницаемой дорожной одежды.

Ключевые слова: автомобильная дорога, высокая насыпь, влажность, грунт, дождь, инфильтрация, математическая модель, рабочий слой.

UDC 625.731

Kaskiv V.I., Cand. Eng. Sci. (Ph.D)

**MATHEMATICAL MODEL DISTRIBUTION SOIL HUMIDITY IN THE
WORKING LAYER HIGH EMBANKMENTS TAKING INTO ACCOUNT
MOISTURE INFILTRATION OF THE RAIN**

Abstract. Because of theoretical and experimental researches the mathematical model of distribution of soil moisture of working layer high embankments of highways is constructed. The character of influence of rains on soils of the subgrade is established which includes the definition of intensity of rains, magnitude and depth of infiltration, distribution of moisture for want of availability of water-permeable and water-impermeable road pavement.

Key words: road, high embankment, moisture, soil, rain, infiltration, mathematical model, working layer.

Вступ

При будівництві автомобільних доріг основні затрати матеріальних і трудових ресурсів, як правило, пов'язані з влаштуванням дорожніх одягів. Аналіз сучасного стану мережі автомобільних доріг загального користування свідчить, що підвищення міцності і строку служби дорожніх одягів досі є актуальною задачею.

При проектуванні дорожньої конструкції враховують вплив навантажень, регіональних природних умов і водно-теплового режиму (ВТР) на надійність і довговічність доріг. Міцність, надійність і довговічність дорожніх одягів, більшим чином це стосується нежорстких дорожніх одягів, суттєво залежать від міцності ґрунтів земляного полотна, зокрема в його робочому шарі. Як правило, максимальна сезонна вологість ґрунтів спостерігається у весняний

(розрахунковий) період. Міцність ґрунтів у цей період суттєво впливає на міцність дорожнього одягу. Звідси постає одна із головних проблем дорожнього будівництва – збільшення міцності ґрунтів земляного полотна в розрахунковий період і підвищення стабільності його властивостей в річному циклі. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми – раціональне регулювання ВТР дорожньої конструкції.

Основна частина

В більшості випадків при регулюванні ВТР дорожньої конструкції приділяють увагу капілярному і пароподібному зволоженню. І дійсно, при близькому заляганні ґрунтових вод їх вплив на вологість ґрунтів земляного полотна може бути вирішальним. Між тим, зволоженням від дії дощів, також не слід нехтувати. Це джерел зволоження є основним для ґрунтів робочого шару високих насипів у теплий період року.

Для України характерний континентальний тип річного ходу опадів, тобто максимальна їх кількість випадає в теплий період року, з квітня по жовтень. У цей період їх випадає від 60 % до 85 % річної кількості, тому саме на цьому періоді і акцентується увага в цій роботі.

Аналіз робіт, присвячених питанням інфільтрації вологи дощів в земляне полотно показав, що в дорожній галузі не існує єдиного підходу до призначення інтенсивності дощу (i). Величина i коливається в межах від 0,17 мм/хв до 1,66 мм/хв за різними відомими розрахунками для одного і того ж дощу. Аналогічна ситуація і в метеорології, де нижня межа, при якій дощі можна вважати зливовими коливається в межах від 0,03 мм/хв до 1,67 мм/хв. В зв'язку з цим, при розв'язанні задач розрахунків інфільтрації вологи в земляне полотно доцільніше використовувати деяку інтенсивність опадів без розподілу їх на обложні чи зливові (не приймаючи до уваги розрахунки для визначення об'ємів зливових вод на водозборах і товщини плівки з умов забезпечення безпеки руху, тому що там інші передумови).

Результати обробки півноіграм дали можливість отримати залежності для знаходження розрахункової приведенної інтенсивності – $i_{пр.р.}$ [1].

При розрахунках ВТР дорожніх конструкцій, найбільш обґрунтованим у теоретичному плані є метод розрахунку вологонакопичення, який

запропонований В.М. Сіденком на основі теорії тепло- і масопереносу в капілярно-пористих середовищах.

З метою можливості використання методології цього методу, запропоновано замінити коефіцієнт вологопровідності, який відображає здатність ґрунтів до капілярного підняття, а не до інфільтрації, коефіцієнтом дифузії ґрунтової вологи (дифузивністю) – D . Обґрунтованість і правомірність цього підтверджується багатогранною практикою досліджень в гідрології. Причому визначення дифузивності базується на характерних для кожного ґрунту характеристиках, що дозволяє значно підвищити точність результатів, які отримують.

Оскільки, за розрахунковий прийнято теплий період року, то можна стверджувати, що до моменту встановлення деякої вологості набагато раніше встановлюється певний розподіл температури, тобто у тілі земляного полотна встановлюється стаціонарний теплообмін ($\partial T/\partial t = 0$).

Вплив атмосферних опадів враховували шляхом введенням функції $f(t)$, яка залежить від кількості опадів, що випали, їх інфільтрації, стоку, випаровування і транспірації. Саму функцію $f(t)$ пропонується знаходити за розробленою автором методикою, основні положення якої базуються на роботах Б.Ф. Перевозникова [2] і В.І. Рувинського [3], а також методу водного балансу:

$$f(t) = \beta \mathfrak{Z}, \quad (1)$$

де β – коефіцієнт розподілу інтенсивності зволоження по площі зволоження, який залежить від інтенсивності і тривалості зволоження, $1/(\text{м год})$;

\mathfrak{Z} – кількість опадів, що просочились у ґрунт робочого шару, м.

Враховуючи (1) і те, що $\partial T/\partial t = 0$, було отримане вихідне рівняння математичної моделі:

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

де W – вологість ґрунту, долі одиниць;

t – час, год;

D – коефіцієнт дифузії капілярної вологи, $\text{м}^2/\text{год}$;

z – глибина (змінна координата), м.

При дії атмосферних опадів має місце інфільтраційний водно-тепловий режим. При цьому режимі для високих насипів можна виділити дві розрахункові схеми, які обумовлюють різні початкові і граничні умови рівняння (2).

Перша схема передбачає відсутність дорожнього одягу або коли він водонепроникний, а також вона буде правомірною для тільки що зведених дорожніх насипів, насипів залізниць, узбіч чи укосів насипів і виїмок, які знаходяться в експлуатації.

Розглядаючи граничну задачу, коли вологість поверхневого шару земляного полотна після проходження дощу наближається до вологості повного вологонасичення ($W_{\text{пв}}$), можна виділити два розрахункові випадки. Перший – коли утворюється тимчасова калюжа і є застій води, а також при довгих затяжних дощах, тоді вологість поверхневого шару досягає $W'_{\text{пв}} = 0,9 W_{\text{пв}}$.

Дослідженнями L. Rehati [4] було встановлено, що коефіцієнт водонасичення ґрунту не перевищує значення 0,9 із-за наявності в його порах повітря. Другий – у всіх інших випадках, і тоді $W'_{\text{пв}} = (0,65-0,85) W_{\text{пв}}$. На підставі досліджень, автором встановлено, що значення цього коефіцієнта залежать від виду ґрунту і інтенсивності опадів.

Виходячи з припущення, що вологість в межах робочого шару змінюється незначно і дорівнює деякій початковій вологості W_0 (вплив ґрунтових вод не враховується, так як насип високий) сформульовані початкові і граничні умови:

$$W(z, 0) = W_0 ; W(0, t) = W'_{\text{пв}} , W(\lambda, t) = W_0, \quad (3)$$

де λ – глибини інфільтрації опадів, тобто глибина до граничного значення якої дія опадів впливає на вологість ґрунтів.

Друга схема передбачає присутність водотривкого дорожнього одягу, що веде до деякої зміни граничних умов, а саме під дорожнім одягом:

$$W(0, t) = W_0 + m_D t, \quad (4)$$

де m_D – коефіцієнт, що дорівнює горизонтальній складовій дифузивності.

Щоб розв'язати рівняння (2) з врахуванням (3) або (4) необхідно спочатку визначити глибину інфільтрації вологи опадів. Для цього приймали наступні припущення, які, як правило, роблять при розв'язанні такого класу задач:

1. Насип розглядали як напівпростір, тобто z змінюється по глибині безмежно, $0 < z < \infty$.

2. У початковий період часу, у насипу (у межах робочого шару) розподіл вологи по глибині постійний і дорівнює W_0 , $W(z, 0) = W_0$.

3. Після закінчення опадів вологість верхнього шару земляного полотна: $W(0, t) = 0,9 W_{\text{пв}} = W'_{\text{пв}}$.

4. При визначенні кінцевої глибини інфільтрації опадів, тобто коли процес умовно завершився, приймають в рівнянні (2) $f(t) = \text{const}$.

У результаті розв'язання рівняння (2) було отримане рівняння для знаходження глибини інфільтрації:

$$W(z, t) = W'_{\text{пв}} + (W_0 - W'_{\text{пв}}) \cdot \left[\text{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] - f(t)t. \quad (5)$$

Оскільки рівняння (5) містить z в неявному вигляді, то для його знаходження необхідно використати припущення про однаковий розподіл вологи з глибиною і метод послідовного наближення. Так як в рівнянні (5) всі члени, крім z , відомі сталі величини, то послідовно збільшуючи z від 0 до λ знаходимо таке його значення, при якому ліва і права частини (4) однакові і рівні W_0 . Отримана величина z і буде шуканою глибиною інфільтрації атмосферних опадів. Правомірність цих тверджень підтвердили проведені експерименти.

Отримавши λ , були розраховані формули розподілу вологості ґрунту для I і II схем.

Результатом досліджень є математична модель розподілу вологості ґрунтів робочого шару високих насипів автомобільних доріг з врахуванням інфільтрації вологи атмосферних опадів:

$$\left. \begin{aligned}
 i_{np,p} &= \varphi(S, t); \\
 f(t) &= \psi(t, \beta, i_{np,p}, Q, E); \\
 W(z, t) &= W_{\text{пв}} + A \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] - f(t)t; \\
 W(z, t) &= W_{\text{пв}} + \frac{Az}{\lambda} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} BC + f(t) L \sum_{n=1}^{\infty} NC \\
 W(z, t) &= W_0 + m_D t \left(1 - \frac{z}{\lambda} \right) - \frac{2m_D t}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} BC + f(t) L \sum_{n=1}^{\infty} NC \\
 A &= (W_0 - W_{\text{пв}}), \quad B = \sin \left(\frac{n\pi z}{\lambda} \right); \\
 C &= \frac{2\lambda^2}{D\pi^3}, \quad L = n^{-1} \exp \left(-\frac{Dn^2\pi^2}{\lambda^2} t \right); \\
 N &= n^{-3} \left((-1)^n - 1 \right) \cdot \left[\exp \left(-\frac{Dn^2\pi^2}{\lambda^2} t \right) - 1 \right].
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де S – середня висота шару опадів, мм;

Q – стік, мм;

E – випаровування, мм.

Висновки

Розроблена математична модель розподілу вологості ґрунтів робочого шару високих насипів автомобільних доріг від дії атмосферних опадів на основі методу розрахунку вологонакопичення в капілярно-пористих середовищах за допомогою заміни коефіцієнта вологопровідності коефіцієнтом дифузії ґрунтової вологи, який відображає здатність ґрунтів до інфільтрації.

Запропоновано метод реалізації даної математичної моделі, який дав можливість отримати розрахункову залежність для визначення глибини інфільтрації вологи дощів.

Експериментальні дослідження розподілу вологості в ґрунтах від дії вологи дощів, разом з теорією планування експерименту, дозволили провести оцінку відповідності результатів теоретичних розрахунків з даними експерименту. Ці співставлення підтвердили адекватність розробленої математичної моделі і показали придатність запропонованих методів дослідження для розв'язування наукових та інженерних задач.

Література

1. Каськів В.І. Удосконалення показників робочої зони високих насипів з врахуванням інфільтрації атмосферних опадів : дис... канд. техн. наук : 05.22.11 / Каськів Володимир Іванович. – К., 1998. – 147 с.
2. Перевозников Б. Ф. Расчеты максимального стока при проектировании дорожных сооружений. – М. : Транспорт, 1975. – 304 с.
3. Рувинский В.И. Прогнозирование водно-теплого режима автомобильных дорог для обоснования специальных методов его регулирования в районах с сезонным промерзанием : дис... д-ра техн. наук : 05.23.14. – М., 1987. – 490 с.
4. Rehati L. Ground Water In Civil Engineering. – Amsterdam-Oxford-New York : Elsevier Scintific Publishing Company, 1983. – 478 p.

Рецензенти:

Кузло М.Т., д-р техн. наук, Національний університет водного господарства та природокористування.

Балашова Ю.Б., канд. техн. наук, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури.

Reviewers:

Kuzlo M.T., Dr. Tech. Sci., National University of Water and Environmental Engineering.

Balashova Yu.B., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Стаття надійшла до редакції: **21.03.2017 р.**