

УДК 625.855.5

Э. М. Каримов

Ошский технологический университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ПРИ ГЛУБОКОМ ЗАЛЕГАНИИ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КЫРГЫЗСТАНА

Цель данной статьи заключается в предварительной оценке состояния грунтов дорожного покрытия, особенно их влажности, с использованием математическо-статистического анализа климатических показателей, определяющих состояние грунта в расчетный период. Задача расчетно-вероятностного подхода к прогнозированию влажности грунтов заключается в обеспечении достаточно надежной оценки характеристик грунтов между капитальными ремонтами дорожного покрытия. Повышение качества работ по проектированию автомобильных дорог с учетом природных и климатических условий особенно важно при улучшении действующих отраслевых нормативно-правовых актов в Кыргызской Республике, учитывая реальные условия эксплуатации. Новизной данной работы является разработка методики прогнозирования показателя влажности глинистых грунтов в земляном полотне автомобильных дорог на участках I типа с учетом критериев увлажненности. Эта методика рекомендуется к применению в процессе проектирования дорог на территории юго-западного Кыргызстана.

Ключевые слова: влажность, земляное полотно, прочность грунтов, расчетный период.

Введение

Согласно источникам [1—3], применяемые в настоящее время расчетно-вероятностные методы предопределения влажности грунтов способствуют обеспечению достаточно надежной оценки характеристик грунтов между капитальными ремонтами покрытий дорог.

Вопросы предварительной оценки состояния грунтов дорожного полотна, точнее влажности, можно решить с помощью полевых и лабораторных способов исследования, а также путем обоснованного математическо-статистического анализа климатических показателей, характеризующих состояние грунта в определенный период времени [3].

Методы и материалы

Прочность грунтов в рабочей зоне дорожного полотна зависит во многом от показателя их влажности [4]. Научно-исследовательские работы, направленные на изучение водно-теплового режима и его влияния на уровень прочности земляного полотна дорог, проводились в период с 2010 по 2022 гг. с целью выявления различных деформаций на автомобильных дорогах.

Математический анализ результатов лабораторных исследований образцов грунтов, полученных с применением способа одноплоскостного среза на автомобильных дорогах юго-западного региона Кыргызстана в пределах V дорожно-климатической зоны (ДКЗ), показал, что на величину угла внутреннего трения $\varphi_{гр}$ суглинка пылеватого грунта влияет его относительная влажность [5—7]. Представленная на рис. 1 зависимость свидетельствует об увеличении относительной влажности грунта с увеличением угла внутреннего трения, о чем свидетельствуют также данные лабораторных испытаний [7].

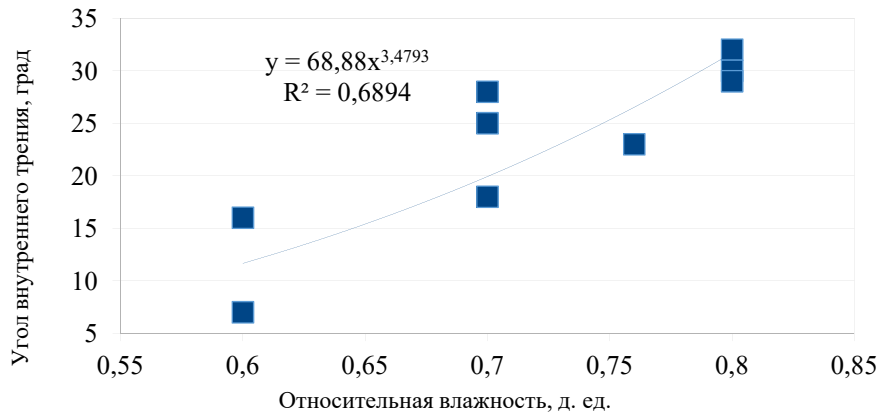


Рис. 1. График зависимости $\varphi_{гр} = f(W_{от})$, характерный для территории V ДКЗ региона исследования [5]

Уравнение регрессии, выражающее связь между относительной влажностью и углом внутреннего трения при указанной криволинейной зависимости, отражается формулой:

$$\varphi_{гр} = 68,88W_{от}^{3,47}, \quad (1)$$

где $\varphi_{гр}$ — величина угла внутреннего трения глинистого грунта, град.; $W_{от}$ — относительная влажность грунта рабочего слоя земляного полотна в долях от W_L .

Теснота, т. е. сила связи между рассматриваемыми признаками, определяется как корреляционное отношение с помощью формулы [8, 9]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2)$$

Значение коэффициента корреляции составило 0,8361; при $R^2 = 0,8361^2 = 0,6999$ коэффициент детерминации составит приблизительно 0,7. В соответствии со шкалой Чеддока [10—12] это можно оценить как высокую тесноту/силу связи между изучаемыми признаками.

Коэффициент детерминации отражает долю дисперсии, объясненную регрессией, в общей дисперсии признака y . Значение коэффициента $R^2 = 0,7$ показывает, что 69 % изменчивости угла внутреннего трения объясняется данной моделью, а остальные 31 % связаны с другими факторами, которые не были учтены в рамках данного исследования.

Оценка качества модели с точки зрения относительного отклонения для каждого наблюдения определяется средней ошибкой аппроксимации, рассчитываемой по формуле:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left[\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right] \cdot 100\%. \quad (3)$$

В нашем случае средняя ошибка аппроксимации составила 15,1 %, что подтверждает корректность подбора модели к исходным данным.

Для оценки степени соответствия модели исходным данным также проведен анализ качества и других параметров регрессионной модели на базе сопоставления критерия Фишера $F_{\text{факт}}$ с табличными значениями $F_{\text{табл}}$ по формуле:

$$F_{\text{табл}} = F(a, k_1, k_2);$$
$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1}. \quad (4)$$

Для $F_{\text{табл}} = F(0,05,1,7) \approx 5,591$.

$$\text{Для } F_{\text{факт}} = \left(\frac{0,699}{1 - 0,699} \right) \cdot \left(\frac{7}{1} \right) \approx 16,258,$$

так как $k_1 = m = 1$, $k_2 = n - m = 9 - 1 - 1 = 7$ и $\alpha = 0,05$.

Таким образом $F_{\text{табл}} < F_{\text{факт}}$, что показывает статистическую значимость и надежность уравнения регрессии.

На рисунке 2 показана прямая зависимость между относительной влажностью грунта и его удельным сцеплением, т. е. увеличение относительной влажности увеличивает удельное сцепление грунта, что подтвердили также результаты наших лабораторных исследований.

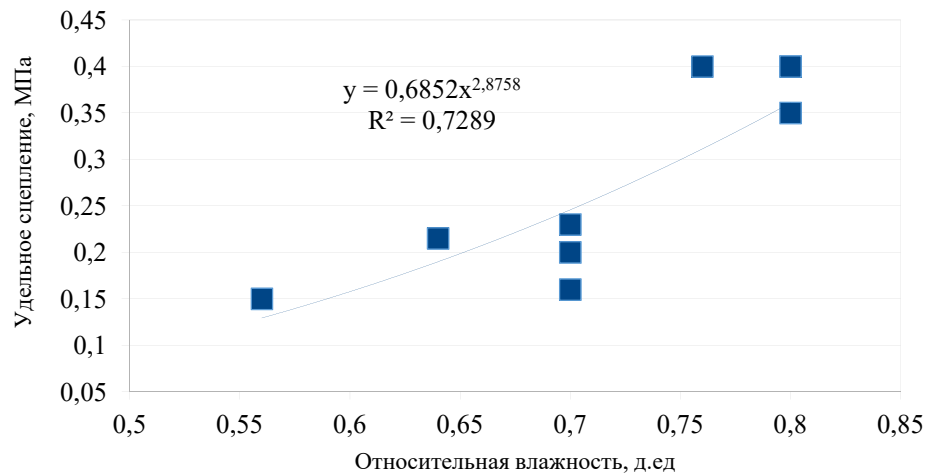


Рис. 2. График зависимости $C_{\text{гр}} = f(W_{\text{от}})$, характерный для территории V ДКЗ региона исследования [7]

Уравнение регрессии, выражающее зависимость относительной влажности от удельного сцепления при вышеприведенной криволинейной зависимости, отражается формулой:

$$C_{гр} = 0,68W_{OT}^{2,87}, \quad (4)$$

где $C_{гр}$ — величина удельного сцепления глинистого грунта, МПа; W_{OT} — относительная влажность грунта рабочего слоя земляного полотна в долях от W_L .

Корреляционное отношение, характеризующее тесноту связи между исследуемыми признаками [8, 9]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (5)$$

Подставляя данные в формулу, получим значение коэффициента корреляции, равное 0,846, при этом $R^2 = 0,846^2 = 0,717$, коэффициент детерминации равен $\approx 0,72$

Значение коэффициента детерминации 0,72 по шкале Чеддока [13, 14] показывает высокий уровень тесноты связи между относительной влажностью и удельным сцеплением, т. е. 72 % изменчивости удельного сцепления объясняется моделью.

В целях оценки точности полученных данных определим среднюю ошибку аппроксимации [13, 14]:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left[\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right] \cdot 100\%. \quad (6)$$

Качество регрессионного уравнения и его параметры можно определить также с использованием критерия Фишера путем сравнения табличного и полученного значения ($F_{табл}$, $F_{факт}$).

Результаты расчетов показали 13,2 % средней ошибки аппроксимации, что можно оценить как хорошее соответствие модели исходным данным. Далее оцениваем качество регрессионного уравнения и его параметров [15—17] путем сопоставления табличного $F_{табл}$ и полученного значения $F_{факт}$ критерия Фишера:

$$F_{табл} = F(a, k_1, k_2);$$

$$F_{факт} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1}.$$

$$\text{Для } F_{табл} = F(0,05, 1, 6) \approx 5,987;$$

$$\text{для } F_{факт} = \frac{0,716}{1 - 0,716} \cdot \frac{6}{1} \approx 15,172,$$

так как $k_1 = m = 1$, $k_2 = n - m = 8 - 1 - 1 = 6$.

Получаем, что $F_{табл} < F_{факт}$, следовательно уравнение регрессии статистически значимо и надежно.

Диаграммы на рис. 3 [7] показывают обратную зависимость относительной влажности грунта и его модуля упругости, т. е. при увеличении влажно-

сти уменьшается упругость, данные лабораторных испытаний подтвердили данное предположение.

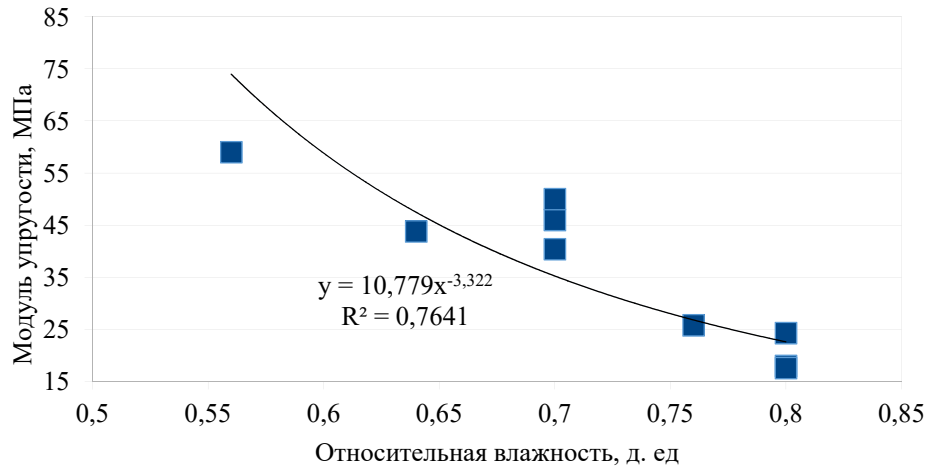


Рис. 3. График зависимости $E_{гр} = f(W_{от})$, характерный для территории V ДКЗ региона исследования [7]

Уравнение регрессии, выражающее связь относительной влажности с характеристиками упругости при данной криволинейной зависимости, имеет вид:

$$E_{гр} = 10,77W_{от}^{-3,32}, \quad (7)$$

где $E_{гр}$ — модуль упругости грунта, МПа; $W_{от}$ — относительная влажность грунта рабочего слоя земляного полотна в долях от W_L .

По формуле [5, 6] определяем тесноту корреляционной связи между исследуемыми показателями:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (8)$$

Значение коэффициента корреляции составило 0,873, а коэффициента детерминации $\approx 0,76$ ($R^2 = 0,873^2 = 0,763$), что свидетельствует о высокой степени зависимости между показателями — 76 % изменчивости модуля упругости может быть объяснено данной моделью.

Вместе с тем обеспечение прочности земляного полотна требует использования различных методов улучшения качества грунта [18—20].

Качество модели, характеризуемое средней ошибкой аппроксимации как величины относительного отклонения по каждому наблюдению, определяется по формуле [8, 9]:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left[\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right] \cdot 100\%. \quad (9)$$

По результатам расчетов установлено, что средняя ошибка аппроксимации равна 10,7 %, т. е. модель хорошо соответствует исходным данным.

Определяем качество регрессионного уравнения согласно критерия Фишера [15—17], сравнивая табличное и полученное значение F_{tabl} и F_{fakt} :

$$F_{\text{tabl}} = F(a, k_1, k_2);$$

$$F_{\text{fakt}} = \frac{R^2}{1-R} \cdot \frac{k_2}{k_1}.$$

$$\text{Для } F_{\text{tabl}} = F(0,05,1,6) \approx 5,987;$$

$$\text{для } F_{\text{fakt}} = \frac{0,763}{1-0,763} \cdot \frac{6}{1} \approx 19,348,$$

так как $k_1 = m = 1$, $k_2 = n - m = 8 - 1 - 1 = 6$ и $\alpha = 0,056$.

Получаем $F_{\text{tabl}} < F_{\text{fakt}}$, что говорит о статистической значимости и надежности уравнения регрессии.

Рассмотренный метод прогнозирования расчетной влажности грунтов земляного полотна на основе формул (1)—(9) входит в группу методов «аналога». При применении данного метода не производится прямое измерение влажности грунта, а используются значения метеорологических параметров, оказывающих воздействие на влагоудерживающие свойства грунта.

Выводы

Рекомендуемая методика определения расчетной влажности предполагает:

1. Использование данных ближайшей к району проектирования дороги метеорологической станции по температуре воздуха и количеству осадков в течение периода влагонакопления.
2. Определение средней температуры воздуха и суммарного количества осадков за период влагонакопления.
3. Определение коэффициента увлажнения и относительной влажности грунта на основе исходных данных по температуре воздуха и осадкам.
4. Вычисление расчетной влажности грунта по уравнениям (1), (4), (7). Для дорог с усовершенствованными типами покрытий выполняется прогноз с 95%-й достоверностью, а для дорог с переходными типами покрытий — с 90%-й достоверностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корсунский М. Б., Россовский П. Д., Гайваронский В. Н. Прогнозирование расчетной влажности грунтов земляного полотна // Труды Союздорнии. 1975. Вып. 76. С. 5—29.
2. Сиденко В. М., Батраков О. Т., Волков М. И. Автомобильные дороги. Совершенствование методов проектирования и строительства. Киев : Будевельник, 1973. 278 с.
3. Ефименко В. Н. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог при глубоком промерзании грунтов (На примере Юго-Востока Западной Сибири): дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 216 с.
4. Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. М. : Транспорт, 1971. 416 с.
5. Алексиков С. В., Волченко Ф. В. Районирование г. Волгограда по условиям зимнего содержания // Матер. IV межд. науч.-техн. конф. «Инженерные проблемы строительного мате-

риаловедения, геотехнического и дорожного строительства». Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2013. С. 46—52.

6. Алексиков С. В., Алаторцев Д. В. Обоснование расчетной влажности грунтов земляного полотна // Наука и техника в дорожной отрасли. 2002. № 3. С. 11—12.
7. Каримов Э. М. Дорожно-климатическое районирование территории юго-западного Кыргызстана с учетом вертикальной зональности. Ош, 2023. 251 с.
8. Громыко А. Д. Общая теория статистики. М., 2014.
9. Мырзаibraимов Р. М. Решение комплексных сквозных задач по экономическому анализу. Ламберт, 2019. С. 8—19.
10. Buda A., Jarynowski A. Life Time of Correlations and its Applications // Wydawnictwo Niezalezne. 2010.
11. Davey C. E., Grayden D. B., Egan G. F., Johnston L. A. Filtering induces correlation in fMRI resting state data // NeuroImage. 2013. Vol. 64. Pp. 728—740.
12. Rummel R. J. Understanding Correlation. University of Hawaii, Honolulu, 1976.
13. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. М. : Высшая школа, 2003. 479 с.
14. Шилова З. В., Шилов О. И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. Киров : Изд-во ВГТУ, 2015. 158 с.
15. Pearson K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents // Proceedings of the Royal Society of London. 1895. Vol. 58. Pp. 240—242.
16. Stigler S. M. Francis Galton's account of the invention of correlation // Statistical Science. 1989. Vol. 4. Iss. 2. Pp. 73—79.
17. Wright S. Correlation and causation // Journal of Agricultural Research. 1921. Vol. 20. Iss. 7. Pp. 557—585.
18. Karimov E. M. Features of Ensuring the Quality of the Subgrade of Motor Roads from Subsidence Loams in Mountainous Areas // Towards an Increased Security: Green Innovations, Intellectual Property Protection and Information Security: Conference proceedings. 2021. Switzerland: Springer, 2022. Pp. 425—433. DOI 10.1007/978-3-030-93155-1_46.
19. Karimov E. M. Features of Soil and Ground Conditions of the Southern Region of Kyrgyzstan for Clarifying the Boundaries of Road and Climatic Zones // Digital Technologies and Institutions for Sustainable Development. Advances in Science, Technology & Innovation. 2022. Pp. 161—164. DOI: 10.1007/978-3-031-04289-8_27.
20. Каримов Э. М. Учет влияния региональных природно-климатических условий на состояние дорожных конструкций территории юго-западной Киргизии // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 81—92.

© Каримов Э. М., 2024

Поступила в редакцию
в июне 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Каримов Э. М. Прогнозирование расчетной влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог при глубоком залегании уровня грунтовых вод на территории юго-западного Кыргызстана // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 3(96). С. 6—13. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_6.

Об авторе:

Каримов Эркинбек Машанович — канд. техн. наук, доц., зав. каф. прикладной механики, Ошский технологический университет (ОшТУ). Кыргызстан, 723503, г. Ош, ул. Н. Исанова, 81; osh.tu.2dyshev@mail.ru

Erinbek M. Karimov

Osh Technological University

FORECASTING OF THE CALCULATED SOIL MOISTURE OF THE ROADBED WITH A DEEP OCCURRENCE OF THE GROUNDWATER LEVEL IN THE TERRITORY OF SOUTHWESTERN KYRGYZSTAN

The purpose of this article is to make a preliminary assessment of the condition of the pavement soils, especially their humidity, using mathematical and statistical analysis of climatic indicators that determine the condition of the soil during the calculation period. The task of the computational probabilistic approach to predicting soil moisture is to provide a sufficiently reliable assessment of soil characteristics between major road surface repairs. Improving the quality of highway design by taking into account regional natural and climatic conditions is especially important when improving existing industry regulations in the Kyrgyz Republic, taking into account real operating conditions. The novelty of this work is the development of a methodology for predicting the calculated moisture content of clay soils of the roadbed on sections of highways of the 1st type of terrain, taking into account the nature and degree of moisture. This technique is used in the design of the road surface in the territory of southwestern Kyrgyzstan.

Key words: humidity, roadbed, soil strength, calculation period.

For citation:

Karimov E. M. [Forecasting of the calculated soil moisture of the roadbed with a deep occurrence of the groundwater level in the territory of southwestern Kyrgyzstan]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 3, pp. 6—13. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_6.

About author:

Erinbek M. Karimov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Osh Technological University. 81, Isanova st., 723503, Osh, Kyrgyzstan; oshtu.2dyshev@mail.ru