

Научная статья
УДК 625.712
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>
EDN: JHPSPG



РАСЧЕТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ И ПОЛНАЯ ВЛАГОЕМКОСТЬ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.С. Александров ✉, Т.В. Семенова, Н.П. Александрова
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)
г. Омск, Россия
✉ ответственный автор
aleksandrov00@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Расчет дорожных одежд по критериям прочности выполняют для расчетного периода года, когда влажность грунтов достигает наибольших значений. Такая влажность называется расчетной и устанавливается путем определения наибольшего значения при заданной односторонней доверительной вероятности с учетом различных поправок на рельеф местности, конструкции земляного полотна и укрепления обочин. Казалось бы, сделано все правильно, но в ряде случаев расчетная влажность достигает больших значений, находящихся в пределах 80...90% от влажности на границе текучести. Такие значения расчетной влажности больше полной влагоемкости некоторых разновидностей грунтов. В этом случае нарушена физика процесса водонасыщения грунта.

Материалы и методы. Для вычисления полной влагоемкости использованы физические основы инженерной геологии, базирующиеся на трехфазной физической модели дисперсного грунта. В этой модели каждая из трех фаз (твердая, жидкая и газообразная) занимает определенный объем, а минеральные частицы и жидкость обладают массой и весом. На основе данной модели получены классические фундаментальные формулы, позволяющие определять любую физическую характеристику грунта. Для расчета полной влагоемкости применены данные фундаментальные зависимости. Расчет полной влагоемкости использован при построении линии нулевого содержания воздуха в грунте при его стандартном уплотнении. Показано, что полная влагоемкость, изображенная на этой линии, является наибольшей влажностью для грунта, уплотненного до данного состояния.

Результаты. Предложен способ вычисления полной влагоемкости грунта при различных коэффициентах уплотнения. В качестве минимально возможного коэффициента уплотнения принимается его величина в зимний период. Эта величина вычисляется с учетом поправки Ю.М. Васильева и А.С. Еремина, учитывающей разуплотнение грунта при замерзании воды. Полная влагоемкость грунта, вычисленная при минимальном коэффициенте уплотнения, представляет собой предельное значение, которое расчетная влажность превышать не может.

Заключение. Изложены представления авторов о физическом состоянии грунтов, согласно которым их расчетная влажность не может превышать полную влагоемкость при данной степени уплотнения. Поэтому величину расчетной влажности, выраженную в долях от влажности на границе текучести W_p / W_T , предлагается ограничить относительным значением полной влагоемкости W_{sut} / W_T .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расчетная влажность, полная влагоемкость, грунт, земляное полотно

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 05.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П. Расчетная влажность и полная влагоемкость грунтов земляного полотна автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 932-947. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>

© Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>

EDN: JHPSPG

DESIGNED MOISTURE AND TOTAL MOISTURE CAPACITY OF SOILS OF THE EARTH BED OF MOTOR ROADS

Anatoly S. Aleksandrov ✉, Tatiana V. Semenova, Nataliya P. Aleksandrova

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

✉ corresponding author

aleksandrov00@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The calculation of road pavements according to strength criteria is performed for the design period of the year, when the soil moisture reaches its highest values. Such moisture is called design moisture and is established by determining the highest value at a given one-sided confidence probability, taking into account various corrections for the terrain, roadbed design and shoulder reinforcement. It would seem that everything is done correctly, but in some cases, the design moisture reaches high values, within 80...90% of the moisture at the fluidity limit. Such values of design moisture are greater than the full moisture capacity of some types of soil. In this case, the physics of the soil water saturation process is violated.

Materials and methods. To calculate the total moisture capacity, the physical principles of engineering geology are used, based on a three-phase physical model of dispersed soil. In this model, each of the three phases (solid, liquid and gaseous) occupies a certain volume, and mineral particles and liquid have mass and weight. Based on this model, classical fundamental formulas are obtained that allow determining any physical characteristic of the soil. These fundamental dependencies are used to calculate the total moisture capacity. The calculation of the total moisture capacity is used when constructing a line of zero air content in the soil with its standard compaction. It is shown that the total moisture capacity depicted on this line is the highest moisture content for soil compacted to this state.

Results. A method for calculating the total moisture capacity of the soil at different compaction coefficients is proposed. Its value in winter is taken as the minimum possible compaction coefficient, calculated taking into account the correction of Yu.M. Vasiliev and A.S. Eremin, which takes into account soil decompression during water freezing. The total moisture capacity of the soil, calculated with a minimum compaction coefficient, is a limit value that the calculated humidity cannot exceed.

Conclusion. The authors' ideas about the physical condition of soils are presented, according to which their calculated humidity cannot exceed the full moisture capacity at a given degree of compaction. Therefore, the value of the calculated humidity, expressed as a fraction of the humidity at the yield point W_p / W_T , is proposed to be limited to the relative value of the total moisture capacity W_{sat} / W_T .

KEYWORDS: calculated Moisture content, total moisture capacity, soil, roadbed

The article was submitted: 18.10.2024; approved after reviewing: 24.10.2024; accepted for publication: 16.12. 2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Designed moisture and total moisture capacity of soils of the earthbed of motor roads. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 932-947. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>

© Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Параметры прочности и деформируемости грунтов земляного полотна зависят от их влажности, поэтому при проектировании дорожных одежд влажность грунтов определяют по ПНСТ 542–2021¹ и ГОСТ Р 71404–2024² для расчетного периода года, вычисляя ее значение по формуле

$$W_p = (W_{\text{табл}} + \Delta + \Delta_1 W - \Delta_2 W) \cdot (1 + V_r \cdot t) - \Delta_3, \quad (1)$$

где $W_{\text{табл}}$ – среднее значение влажности грунта, выраженное в долях от влажности на границе текучести, регламентируемое таблицами стандартов РФ; Δ , $\Delta_1 W$, $\Delta_2 W$ и Δ_3 – поправки, регламентируемые стандартами РФ и учитывающие факторы, влияющие на процесс влагонакопления; V_r и t – параметры математической статистики, назначаемые в зависимости от принятой в расчете односторонней доверительной вероятности.

Из анализа формулы (1) следует, что стандарты России регламентируют вычисление расчетной влажности связных грунтов с применением правил математической статистики, учитывая физические аспекты процесса влагонакопления путем введения поправок (Δ , $\Delta_1 W$, $\Delta_2 W$ и Δ_3). Вследствие этого расчетная влажность может достигать больших значений. Так, приложения ГОСТ Р 71404–2024 содержат табличные функциональные зависимости модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения грунта от его влажности. Согласно этим таблицам, расчетная влажность W_p может достигать значений 0,90 и 0,95 от влажности на границе текучести W_L (ГОСТ Р 71404–2024, табл. В4 и В5).

Отметим, что для различных грунтов характерно разное соотношение полной влагоемкости $W_{\text{сут}}$ и влажности на границе текучести. Для одних грунтов характерно неравенство $W_{\text{сут}} \geq W_L$, благодаря чему относительная полная влагоемкость больше или равна единице ($W_{\text{сут}}/W_L \geq 1$). В этом случае применение зависимости (1) вполне обосновано, вследствие

чего решение (1) для таких грунтов можно считать однозначным. Тем не менее существуют разновидности уплотненных грунтов, для которых характерно иное неравенство $W_{\text{сут}} \leq W_L$. В этом случае относительная полная влагоемкость $W_{\text{сут}}/W_L$ будет меньше или равна единице. Тогда для разновидностей грунтов с относительной полной влагоемкостью $W_{\text{сут}}/W_L \leq 1$ применение зависимости (1) может приводить к физической ошибке, состоящей в том, что расчетная влажность, вычисленная по решению (1), превышает их полную влагоемкость. Причем для глинистых грунтов расчетная влажность грунта, вычисленная по формуле (1), превышает их полную влагоемкость при коэффициентах уплотнения 0,90 и выше. Для определения расчетной влажности наряду с ее вычислением по формуле (1) необходимо произвести расчет относительной полной влагоемкости. В этом случае расчетная влажность определяется как наименьшее из двух значений, вычисленных по формуле (1), и зависимости для определения относительной полной влагоемкости. При таком подходе физический смысл остается ненарушенным.

Сложность решения задачи о величине полной влагоемкости грунта состоит в том, что в процессе годового цикла грунты земляного полотна могут изменять объем. В данном случае плотность скелета и коэффициент уплотнения тоже изменяются. Механизм этих изменений лежит в деформациях морозного пучения, набухания и усадки грунтов. Деформации морозного пучения и набухания грунтов приводят как к появлению разрушений и деформаций на поверхности покрытия, так и к разуплотнению грунтов. В процессе разуплотнения грунта появляется дополнительная пористость, заполняемая водой. Негативное влияние процессов морозного пучения на транспортно-эксплуатационные показатели дорог многократно подтверждено специалистами дорожной отрасли [1, 2]. Для недопущения возникновения чрезмерных деформаций морозного пучения стандарты РФ регламентируют расчет дорожных одежд по критерию морозоустойчивости. Влияние деформаций морозного пучения на ров-

¹ ПНСТ 542–2021 (взамен ПНСТ 265–2018) (срок действия с 01.06.2021 г. до 01.06.2024 г.). Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 мая 2021 г. № 34-пнст. М.: Стандартинформ, 2021 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

² ГОСТ Р 71404–2024 (взамен ПНСТ 542–2021) (введен 01.09.2024 г.). Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. № 1022-ст. М.: Стандартинформ, 2024 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

ность проезжей части учитывается в научных работах настоящего столетия путем разработки новых методов расчета дорожной одежды [3, 4]. Но факт негативного влияния деформаций увеличения объема на плотность скелета грунта (плотность сухого грунта), а равно коэффициент уплотнения, как правило, остается «за кадром». При этом нужно отметить, что теоретические основы процесса накопления влаги в грунте учитываются специалистами, например, в виде уравнения водного баланса [5]. Физические характеристики грунтов, такие как пористость, коэффициент пористости, полная влагоемкость, относятся специалистами к интразональным факторам, подлежащим обязательному учету при дорожно-климатическом районировании [6]. Тем не менее, специалисты в области водно-теплого режима [6] приходят к выводу, что прогнозирование расчетной влажности грунта должно выполняться с применением методов математической статистики, позволяющих вычислять расчетное значение характеристики по выборке экспериментальных данных. В пользу статистического подхода говорят данные экспериментов по определению влажности в расчетный период года и ее изменению в течение года. Авторы работы³, проведя экспериментальные исследования влажности грунтов земляного полотна, установили, что она может значительно изменяться в зависимости от грунтово-гидрологических, погодных-климатических, географических и дорожных условий. Согласно данным этой работы, применительно к территории Волгоградской области, расчетная влажность глинистых грунтов земляного полотна изменяется в пределах 0,36...0,55, 0,38...0,60 и 0,39...0,62 от влажности на границе текучести соответственно при 1, 2 и 3 типе местности по условиям увлажнения. Очевидно, что наибольшие значения относительной влажности грунтов сопоставимы с их полной влагоемкостью при коэффициентах уплотнения 0,95 и выше, а наименьшие значения расчетной влажности не достигают величины полной влагоемкости.

Малые расчетные влажности могут быть обусловлены условиями увлажнения рабочего слоя, к которым относятся расстояние до источников увлажнения (грунтовые воды, воды в боковых канавах), количество осадков, глубина промерзания, рельеф местности, тип местности по условиям увлажнения и пр. факторы. Совокупность таких факторов приводит

к тому, что влажность грунта в расчетный период года не достигает значений полной влагоемкости. В этом случае практический интерес представляет сравнение низкой расчетной влажности с влажностью на пределе усадки (один из пределов Аттеберга). Если влажность грунта в расчетный период года окажется ниже этого предела, то деформации изменения объема грунта невозможны. Это означает полную устойчивость земляного полотна к деформациям пучения и набухания, а условия, приводящие к столь низкой влажности, необходимо изучать и искать способы их тиражирования на другие участки дорог с более высокой расчетной влажностью.

В работе [7] показана динамика изменения степени уплотнения глинистых грунтов по месяцам года, согласно которой наименьшее значение коэффициента уплотнения (чуть больше 0,92) приходится на февраль. В работах [7, 8] приведена динамика изменения влажности глинистых грунтов, в соответствии с которой наибольшая влажность характерна для периода оттаивания грунтов. Такое поведение грунтов объясняется их разуплотнением, происходящим в результате набухания и морозного пучения, с последующим обратным уплотнением, обусловленным усадкой и действием нагрузок, в периоды просыхания (уменьшения влажности). Суть этого процесса состоит в том, что повышение влажности грунтов в осенний расчетный период приводит к деформациям набухания и началу морозного пучения, которое продолжается зимой до промерзания грунтов на максимально возможную глубину. Деформации изменения объема неизбежны в том случае, если осенняя влажность этих грунтов превышает влажность на границе усадки. Образование дополнительной пористости от деформаций набухания и пучения приводит к уменьшению плотности сухого грунта и увеличению пористости, что обуславливает повышение полной влагоемкости. Разуплотнение грунтов подтверждено и данными георадиолокационных исследований [9, 10, 11]. Согласно работам А.М. Кулижникова, Р.А. Еремина и соавторов [9, 10, 11] при выполнении георадиолокационных исследований наблюдается увеличение амплитуды и снижение частоты отслеживаемого сигнала. Это свидетельствует о наличии в земляном сооружении зон разуплотненного грунта и зон повышенной влажности. В связи с таким поведением грунтов земляного

³ Алексиков С.В., Алексиков И.С., Симончук Д.Н. Проектирование оптимальных дорожных одежд: учебное пособие. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ. 2015. 118 с.

полотна в научных работах расчетную влажность грунта вычисляют с учетом деформаций морозного пучения [12, 13].

Таким образом, выполненный нами обзор показывает, что влажность грунта земляного полотна не может превышать полную влагоемкость, обусловленную его пористостью. Но уменьшение степени уплотнения грунта приводит к увеличению пористости и полной влагоемкости, а значит, возможному повышению расчетной влажности. Отсюда следует необходимость ограничения расчетной влажности грунта величиной, соответствующей их полной влагоемкости, достигаемой с учетом сезонного разуплотнения грунта в результате морозного пучения зимой и набухания глинистых грунтов в расчетные периоды года. Поэтому целью нашей работы является определение полной влагоемкости грунта при различном его состоянии по степени уплотнения, для ограничения расчетной влажности, вычисляемой по статистической зависимости (1). Решение этой задачи состоит в применении физических основ инженерной геологии, позволяющих рассчитывать полную влагоемкость через другие характеристики физического состояния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вывод формул, предназначенных для вычисления параметров физических свойств дисперсных грунтов, базируется на известной расчетной трехфазной модели, представляющей некоторую абстракцию реального строения грунта. Эта классическая модель приведена на рисунке 1, на котором схематично показано реальное строение дисперсного грунта.

В дисперсном грунте между минеральными частицами расположены поры, в которых находятся воздух (смесь газов) и жидкость (рисунок 1, а). В этом случае три фазы перемешаны. Поэтому в целях теоретического анализа применяют упрощенную модель фазового состава, в которой каждая из трех фаз занимает определенный объем (V_s , V_w , V_g), а твердые частицы и жидкость характеризуются весом (G_s и G_w соответственно), как показано на рисунке 1, б. Данная физическая модель позволяет определить любой из показателей физических свойств, она является традиционной и приводится в учебной литературе⁴.

Модель трехфазного строения дисперсного грунта имеет два частных случая. Первый ха-

рактеризуется нулевым содержанием воздуха в порах (рисунок 1, в), когда все поровое пространство заполнено жидкой фазой, а максимально возможная влажность грунта w равна его полной влагоемкости W_{sat} . Второй частный случай, наоборот, характеризуется нулевым содержанием жидкой фазы, когда в порах находится только воздух, вследствие чего вес всего объема грунта обусловлен только весом твердых частиц.

Для вывода формул, позволяющих вычислять плотности грунта ρ , скелета грунта ρ_d и минеральной части ρ_s , нужно составить выражения для определения объемного веса грунта γ , скелета грунта γ_d и минеральной части γ_s . Воспользовавшись обозначениями, показанными на рисунке 1, б, объемный вес грунта, скелета грунта и минеральной части находят по формулам:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{G}{V} = \frac{G_s + G_w}{V_s + V_w + V_g} = \rho \cdot g; \\ \gamma_d &= \frac{G_s}{V} = \frac{G_s}{V_s + V_w + V_g} = \rho_d \cdot g; \\ \gamma_s &= \frac{G_s}{V_s} = \rho_s \cdot g, \end{aligned} \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести, m/c^2 .

При дальнейшем анализе приходят к выводу, что каждая из плотностей ρ , ρ_d и ρ_s вычисляется отношением соответствующей массы и соответствующего объема, то есть по формулам:

$$\rho = \frac{m}{V}; \rho_d = \frac{m - m_w}{V} = \frac{m_d}{V}; \rho_s = \frac{m_s}{V_s}. \quad (3)$$

Выполняя аналогичные рассуждения, можно прийти к выводу, что влажность грунта находится по формулам:

$$w = \frac{G_w}{G - G_w} = \frac{G - G_s}{G_s} = \frac{G_w}{G_s}; w = \frac{\gamma - \gamma_d}{\gamma_d}. \quad (4)$$

В последней формуле (4) вес грунта можно определить произведением соответствующей плотности и ускорения силы тяжести. Тогда несложно прийти к классическим зависимостям, связывающим влажность с плотностью грунта и плотностью скелета грунта. Эти формулы имеют вид:

⁴Цытович Н.А. Механика грунтов: учебное пособие. М.: Госстройиздат, 1963. 636 с.

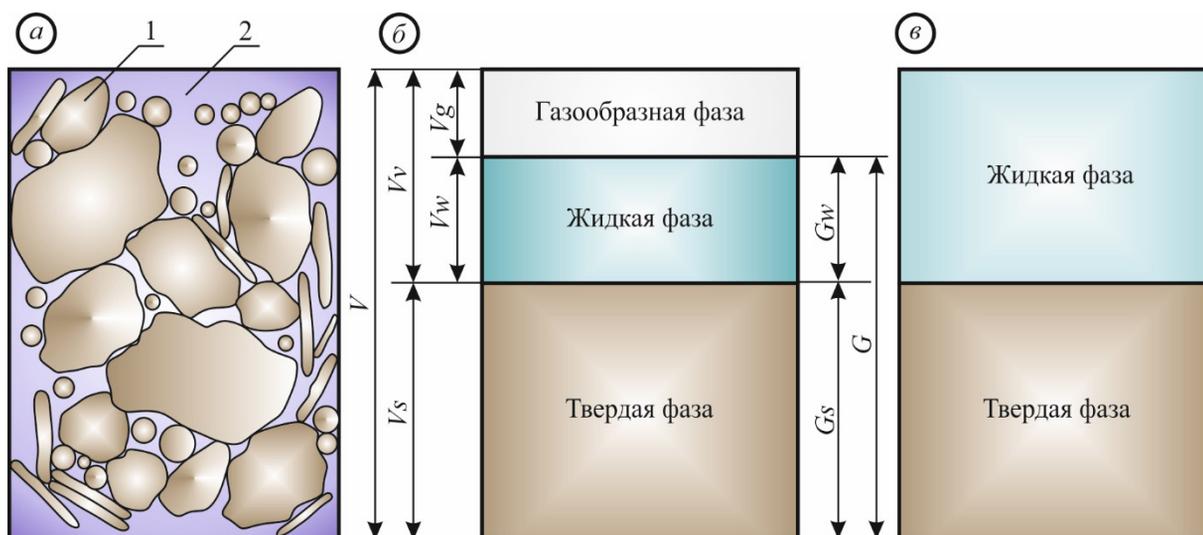


Рисунок 1 – Традиционные представления о фазовом составе дисперсного грунта:
 а – реальное строение;
 б – упрощенная модель трехфазного строения;
 в – модель, иллюстрирующая частный случай, характеризующий нулевое содержание воздуха в порах [14,15].

Figure 1 – Traditional ideas about the phase composition of dispersed soil:
 a – the real structure;
 b – a simplified model of a three-phase structure;
 c – a model illustrating a special case characterizing zero air content in the pores [14, 15].

$$w = \frac{\rho}{\rho_d} - 1; \rho = \rho_d \cdot (1 + w); \rho_d = \frac{\rho}{1 + w}. \quad (5)$$

Формулы (5) позволяют рассчитывать один параметр физических свойств через два других известных параметра. Последняя формула (5) применяется для вычисления плотности сухого грунта по методу, регламентированному ГОСТ 5180–2015⁵. Аналогичным образом получены классические формулы, применяемые для расчета пористости n , коэффициента пористости e . Эти формулы имеют вид:

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}; n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}. \quad (6)$$

$$e = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_d}; e = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_d}. \quad (7)$$

Для расчета плотности скелета грунта, применяемой в формулах (6) и (7), можно использовать последнюю из формул (5). Тогда пористость и коэффициент пористости определяются не через два, а через три известных параметра физических свойств. Выполнив различные преобразования в формулах (5), (6), (7), специалисты получили расчетный способ определения любой физической характеристики грунта через другие известные физические характеристики (обычно через две или три). Формулы, применяемые в расчетном способе, даны в таблице 1.

⁵ГОСТ 5180–2015 (взамен ГОСТ 5180–84) (введен 01.04.2016 г.). Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 ноября 2015 г. № 1694-ст. М.: Стандартинформ, 2016 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

Таблица 1
Формулы для расчета физических характеристик дисперсных грунтов [14, 15]

Table 1
Formulas for calculating the physical characteristics of soils [14, 15]

Показатель	ρ	ρ_d	ρ_s	n	e	w
ρ	ρ	$\rho_d \cdot (1+w)$	$\rho_s \cdot (1-n) \cdot (1+w)$	$\rho_s \cdot (1-n) \cdot (1+w)$	$\frac{\rho_s \cdot (1+w)}{1+e}$	$\rho_d \cdot (1+w)$
ρ_d	$\frac{\rho}{1+w}$	ρ_d	$\rho_s \cdot (1-n)$	$\rho_s \cdot (1-n)$	$\frac{\rho_s}{1+e}$	$\rho \cdot (1+w)$
ρ_s	$\frac{\rho}{(1-n) \cdot (1+w)}$	$\frac{\rho_d}{(1-n)}$	ρ_s	$\frac{\rho_d}{(1-n)}$	$\rho_d \cdot (1+e)$	$\frac{\rho}{(1-n) \cdot (1+w)}$
n	$1 - \frac{\rho}{\rho_s \cdot (1+w)}$	$1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$	$1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$	n	$\frac{e}{1+e}$	$1 - \frac{\rho}{\rho_s \cdot (1+w)}$
e	$\frac{\rho_s \cdot (1+w)}{\rho}$	$\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$	$\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$	$\frac{n}{1-n}$	e	$\frac{\rho_s \cdot (1+w)}{\rho} - 1$
w	$\frac{\rho}{\rho_d} - 1$	$\frac{\rho}{\rho_d} - 1$	$\frac{\rho}{\rho_s \cdot (1-n)} - 1$	$\frac{\rho}{\rho_s \cdot (1-n)} - 1$	$\frac{\rho \cdot (1+e)}{\rho_s} - 1$	w

Заметим, что данные таблицы 1 можно дополнить формулами, позволяющими определять полную влагоемкость грунта W_{sut} . В этом случае полную влагоемкость можно вычислять через различные показатели физических свойств. Такой подход позволяет привести ряд альтернативных зависимостей, включающих в себя разные физические параметры, приводящих к одному и тому же результату расчета. В настоящей работе мы стремимся к применению только одной зависимости для расчета полной влагоемкости. Данную зависимость можно получить из анализа метода построения линии нулевого содержания воздуха, регламентируемого ГОСТ 22733–2016⁶.

В соответствии с требованиями ГОСТ 22733–2016 для проверки правильности проведенного испытания необходимо построить линию нулевого содержания воздуха. Построение такой линии выполняют путем вычисления наибольшего значения плотности сухого грунта ρ_d , которая была бы достигнута

при условии полного насыщения образца водой. Этот расчет производят по формуле

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + 0,01 \cdot w \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w}}, \quad (8)$$

где ρ_s и ρ_w – соответственно плотности частиц грунта и воды, г/см³; w – влажность грунта в каждом конкретном опыте по определению максимальной плотности, но принимаемая в данном расчете за полную влагоемкость грунта, %.

Уравнение (8) можно решить относительно влажности w , которая в данном случае характеризует полную влагоемкость грунта W_{sut} . Выполнив необходимые преобразования, получим

$$W_{sut} = 100 \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \right), \quad (9)$$

⁶ ГОСТ 22733–2016 (взамен ГОСТ 22733–2002) (введен 01.01.2017 г.). Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2016 г. № 891-ст. М.: Стандартинформ, 2019 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

где ρ_d – плотность сухого грунта, полученная в каждом конкретном опыте при определении максимальной плотности.

Расчет по формуле (9) является аналогом расчета по формуле (8), но имеет иную структуру. Поясняя разницу двух аналогичных расчетов, укажем, что:

– в результате расчета по формуле (8) вычисляется наибольшее значение плотности сухого грунта при условии отсутствия в его порах воздуха. В этом случае мы полагаем, что применяемая в расчете влажность грунта w является его полной влагоемкостью W_{sat} ;

– расчеты по зависимости (9) основаны на подстановке в эту формулу опытных значений плотности сухого грунта ρ_d , полученных при определении ее максимального стандартного

значения. В этом случае вычисляем значение полной влагоемкости W_{sat} при конкретной величине плотности сухого грунта.

В качестве примера рассмотрим данные по испытанию суглинка тяжелого пылеватого, отобранного в грунтовом карьере, расположенном в Любинском муниципальном районе Омской области (д. Тарлык). Показатели физических свойств этого грунта определены в соответствии с требованиями стандартов РФ, а их значения указаны в таблице 2.

В таблице 3 приведены результаты экспериментального определения максимальной стандартной плотности и результаты расчета плотности сухого грунта и полной влагоемкости по формулам (8) и (9).

Таблица 2

Показатели физических свойств суглинка тяжелого пылеватого

Источник: составлено по результатам лаборатории кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

Table 2

Indicators of the physical properties of heavy powdery loam

Source: compiled according to the results of the laboratory of the Department of Road Construction and Operation.

Наименование показателя	Единицы измерения	Величина
Естественная влажность	%	19,9
Плотность частиц грунта	г/см ³	2,68
Максимальная плотность сухого грунта	г/см ³	1,69
Оптимальная влажность	%	18,3
Влажность на границе текучести	%	36,6
Влажность на границе раскатывания	%	19,5
Число пластичности	%	16,8
Показатель консистенции	д.е	0,03
Содержание песчаных частиц размером 2–0,05 мм	%	26

Таблица 3

Результаты определения максимальной плотности и вычисления параметров линии нулевого содержания воздуха

Источник: составлено по результатам лаборатории кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

Table 3

The results of determining the maximum density and calculating the parameters of the zero air content line

Source: compiled according to the results of the laboratory of the Department of Road Construction and Operation.

Данные для построения кривой стандартного уплотнения и линии нулевого содержания воздуха		Опытные данные и результаты расчета						
Кривая стандартного уплотнения	Влажность, %	12,8	14,9	16,7	18,6	20,9	22,9	24,4
	Плотность сухого грунта, г/см ³	1,52	1,59	1,65	1,69	1,67	1,62	1,58
Линия НСВ расчет по формуле (2)	Влажность, %	–	–	–	18,6	20,9	22,9	24,4
	Плотность сухого грунта, г/см ³	–	–	–	1,79	1,72	1,66	1,62
Линия НСВ расчет по формуле (3)	Плотность сухого грунта, г/см ³	1,52	1,59	1,65	1,69	1,67	1,62	1,58
	Полная влагоемкость, %	28,5	25,6	23,3	21,9	22,6	24,4	26,0

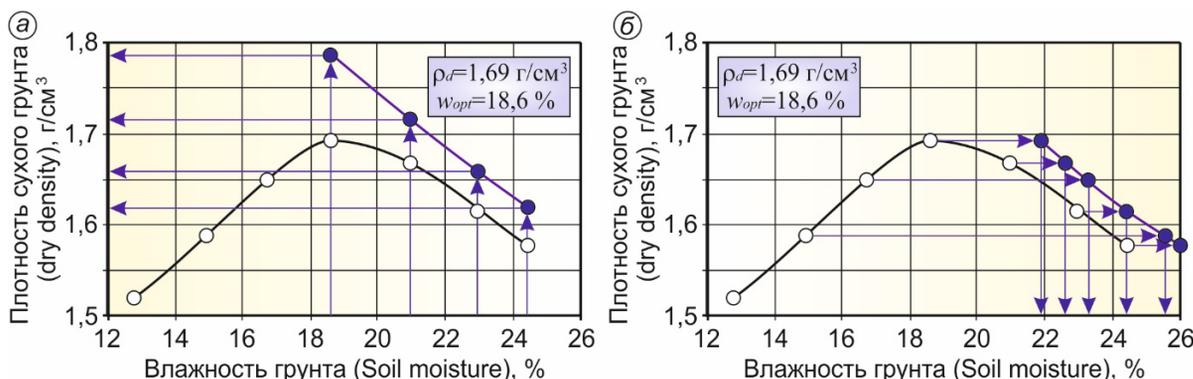


Рисунок 2 – Кривая стандартного уплотнения и линии нулевого содержания воздуха, построенные по данным расчетов по формулам (8) и (9): а – расчет по формуле (8); б – расчет по формуле (9)

Источник: составлено авторами согласно требованиям ГОСТ 22733 и данным расчета по формуле (9).

Figure 2 – The curve of the standard seal and the lines of zero air content, constructed according to the calculations according to formulas (8) and (9): a – calculation according to formula (8); b – calculation according to formula (9)

Source: compiled by the authors, according to the requirements of GOST 22733 and calculation data according to the formula (9).

Таблица 4
Зависимость полной влагоемкости от коэффициента уплотнения грунта (суглинка тяжелого, пылеватого)
Источник: составлено авторами.

Table 4
Dependence of the total moisture capacity on the soil compaction coefficient
Source: compiled by the authors.

Наименование характеристики		Величина характеристики						
Плотность сухого грунта $\rho_{d, \text{г/см}^3}$		1,52	1,58	1,59	1,62	1,65	1,67	1,69
Коэффициент уплотнения K_v		0,90	0,93	0,94	0,96	0,98	0,99	1,0
Полная влагоемкость $W_{\text{сут}}$	%	28,5	26,0	25,6	24,4	23,3	22,6	21,9
	доли от W_L	0,78	0,71	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60

Разницу в построении линии нулевого содержания воздуха при расчете ее параметров по формулам (8) или (9) можно продемонстрировать графически, используя данные таблицы 3. На рисунке 2 представлены кривая стандартного уплотнения и линии нулевого содержания воздуха, построенные по данным таблицы 3.

Из анализа данных рисунка 2 следует, что в случае стандартного построения линии нулевого содержания воздуха, основанного на вычислении плотности сухого грунта по формуле (8), эта линия располагается выше кривой стандартного уплотнения. В таком слу-

чае плотность сухого грунта, вычисленная по формуле (8), должна быть больше экспериментальных значений плотности скелета, установленных при той же влажности. При применении формулы (9) линия нулевого содержания воздуха расположена правее кривой стандартного уплотнения, поэтому значения полной влагоемкости грунта, вычисленные по формуле (9), должны быть больше влажностей, установленных в опыте по стандартному уплотнению.

Для практики интересен анализ рисунка 2, б, на котором приведены значения полной влагоемкости грунта при различных, но кон-

кретных (строго определенных) физических состояниях грунта по плотности скелета, а равно и пористости. В рамках этого анализа определим коэффициенты уплотнения грунта (делим плотность сухого грунта на максимальную плотность) и соответствующие им значения полной влагоемкости, выраженной в долях от границы текучести. Результаты расчета представлены в таблице 4 в порядке возрастания коэффициента уплотнения.

Из анализа данных таблицы 4 следует, что:

– при величине коэффициента уплотнения грунта рабочего слоя, находящейся в пределах 0,98...1,0, величина полной влагоемкости, выраженная в долях от влажности на границе текучести, варьируется в пределах 0,64...0,60. Следовательно, грунты рабочего слоя насыпей, отсыпанных из данного грунта и уплотненные до величины коэффициента уплотнения 0,98, не могут иметь расчетную влажность, превышающую значение 0,64 от границы текучести;

– при коэффициенте уплотнения 0,90 относительная полная влагоемкость W_{sut}/W_L суглинка тяжелого пылеватого не превышает значение 0,78. Согласно СП 34.13330.2021⁷ коэффициент уплотнения грунта 0,9 соответствует требуемому значению этого параметра, регламентируемому для рабочего слоя выемок, построенных в IV и V ДКЗ. Причем требуемая величина коэффициента уплотнения, равная 0,9, является наименьшим значением из всех аналогичных характеристик, регламентируемых СП 34.13330.2021 для других грунтовых сооружений, устраиваемых в различных ДКЗ. Следовательно, расчетная влажность суглинка тяжелого пылеватого не может превышать величину 0,78 от влажности на границе текучести.

Отсюда следует вывод о необходимости пересмотра методики вычисления расчетной влажности, регламентируемой стандартами по расчету дорожных одежд.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Формулу (9) можно применить для расчета полной влагоемкости грунта при различной степени его уплотнения. Для этого в зависимо-

сти (9) плотность сухого грунта нужно представить произведением коэффициента уплотнения k_y и максимальной стандартной плотности ρ_{max} . Тогда формула (9) примет вид:

$$W_{sut} = 100 \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left(\frac{\rho_s}{k_y \cdot \rho_{max}} - 1 \right). \quad (10)$$

Для применения зависимости (10) в практических инженерных расчетах нужно определить величину коэффициента уплотнения грунта k_y в расчетный период года. Для этого определяется уменьшение коэффициента уплотнения, происходящее за счет деформаций увеличения объема, приводящего к повышению пористости грунта. Точное решение этой задачи требует выполнения экспериментов с последующим анализом опытных данных об изменении коэффициентов уплотнения грунта на протяжении года. Такие эксперименты необходимо произвести для различных грунтов, в разных регионах, при различных конструкциях земляного полотна, укрепления обочин и многих других факторах. Таким образом, точное решение требует огромного количества экспериментов, поэтому такое решение невозможно. Тем не менее специалисты старшего поколения предпринимали попытки решения аналогичной задачи. Благодаря таким работам, мы можем найти приближение, точность которого достаточна для инженерных расчетов. Воспользуемся обобщением Ю.М. Васильева и А.С. Еремина, сделанным ими при разработке ВСН 55–69⁸. Авторы ВСН 55–59 пишут: «В зимних условиях, ввиду разуплотнения грунта при замерзании, коэффициент уплотнения K , который определяется на основе испытания образцов мерзлого грунта, отбираемых из уплотненных слоев насыпи, принимают равным»:

$$K = K_{факт} + \beta, \quad (11)$$

где $K_{факт}$ – фактический коэффициент уплотнения, установленный на образцах мерзлого грунта; β – величина поправки, равная для связных грунтов 0,03–0,04, для несвязных – 0,01–0,02.

⁷ СП 34.13330.2021 (введен 10.08.2021 г.). Автомобильные дороги. Актуализированная редакция «СНиП 2.05.02–85* Автомобильные дороги»: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 февраля 2021 г. № 53/пр. М.: Стандартинформ, 2021 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

⁸ ВСН 55–69. Инструкция по определению требуемой плотности и контролю за уплотнением земляного полотна автомобильных дорог. М.: Оргтрансстрой, 1969.

Из анализа формулы (11) следует, что испытание мерзлого грунта, выполненные при зимнем строительстве, приводят к пониженному значению коэффициента уплотнения $K_{\text{факт}}$. Но после оттаивания и процесса высыхания грунта, сопровождающего его усадкой, коэффициент уплотнения возрастает на величину поправки β . Нам же необходимо решить обратную задачу, состоящую в определении величины уменьшения коэффициента уплотнения. Тогда по аналогии с формулой (6) можно предположить, что при зимнем разуплотнении грунта коэффициент уплотнения уменьшается на ту же величину β , но от требуемого своего значения $k_{y(\text{тр})}$. Тогда коэффициент уплотнения зимой можно вычислить по формуле

$$K_{\text{факт}} = k_{y(\text{тр})} - \beta. \quad (12)$$

Окончательное решение получаем заменой в формуле (9) величины k_y на разность, расположенную в правой части зависимости (12). Тогда имеем

$$W_{\text{сут}} = 100 \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left[\frac{\rho_s}{(k_{y(\text{тр})} - \beta) \cdot \rho_{\text{max}}} - 1 \right]. \quad (13)$$

Формула (13) позволяет вычислить полную влагоемкость, выраженную в процентах. Для определения относительной влагоемкости обе части уравнения (13) нужно разделить на влажность на границе текучести, выраженную в %. Тогда получим

$$\frac{W_{\text{сут}}}{W_L} = \frac{100}{W_L} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left[\frac{\rho_s}{(k_{y(\text{тр})} - \beta) \cdot \rho_{\text{max}}} - 1 \right]. \quad (14)$$

Зависимость (14) содержит физические характеристики грунта ($W_L, \rho_s, \rho_{\text{max}}$), которые определяются по ГОСТ 5180–2015. Определение этих физических характеристик не составляет какой-либо сложности для специалистов дорожной грунтовой лаборатории. Требуемая величина коэффициента уплотнения $k_{y(\text{тр})}$ устанавливается по требованиям СП 34.13330.2021.

Таким образом, наше предложение сводится к определению расчетной влажности грунта земляного полотна по результатам расчета относительной влажности по двум формулам (1) и (14). Порядок расчета может быть следующим:

1. Вычисление расчетной влажности, выраженной в долях от влажности на границе текучести, по формуле (1). В этом случае учитываются особенности рельефа местности, конструкций земляного полотна и обочин, а также тип местности по условиям увлажнения.

2. Вычисление относительной полной влагоемкости по формуле (14). Этим расчетом определяется максимально возможная влажность грунта, выраженная в долях от влажности на границе текучести, которую может вместить грунт с данным физическим состоянием по степени уплотнения. Расчет выполняется с допущением некоторого разуплотнения грунта в зимний период, обусловленный замерзанием воды, накопившейся в грунте в период осенней распутицы.

3. В качестве расчетной влажности принимается наименьшее значение из вычисленных по формулам (1) и (14). По принятому значению расчетной влажности устанавливаются параметры прочности и деформируемости грунта, применяемые в расчете дорожной одежды.

Для иллюстрации зависимости полной влагоемкости грунта от коэффициента уплотнения и его снижения зимой по формулам (13) и (14) выполнены расчеты. Результаты этих расчетов приведены на рисунке 3.

Из анализа данных рисунка 3 следует, что абсолютное и относительное значение полной влагоемкости увеличивается при уменьшении коэффициента сцепления. Так как требования к величине коэффициента уплотнения, регламентируемые СП 34.13330.2021, зависят от ряда условий, то могут возникать два случая. Например, в верхней части рабочего слоя насыпи, ограниченной снизу расстоянием 1,5 м от поверхности покрытия, требуемая величина коэффициента уплотнения наибольшая. В этом случае даже с учетом уменьшения коэффициента уплотнения в зимний период полная влагоемкость грунта в период его оттаивания будет наименьшей. Тогда возможен случай, при котором имеет место превышение расчетной влажности, вычисленной по зависимости (1), относительной полной влагоемкости, рассчитанной по выражению (9). Значит, в данном случае расчетную влажность необходимо принять равной относительной полной влагоемкости, то есть в этом случае расчет по формуле (9) является определяющим. Для участков земляного полотна, проложенных в выемке, требуемый коэффициент уплотнения будет наименьшим.

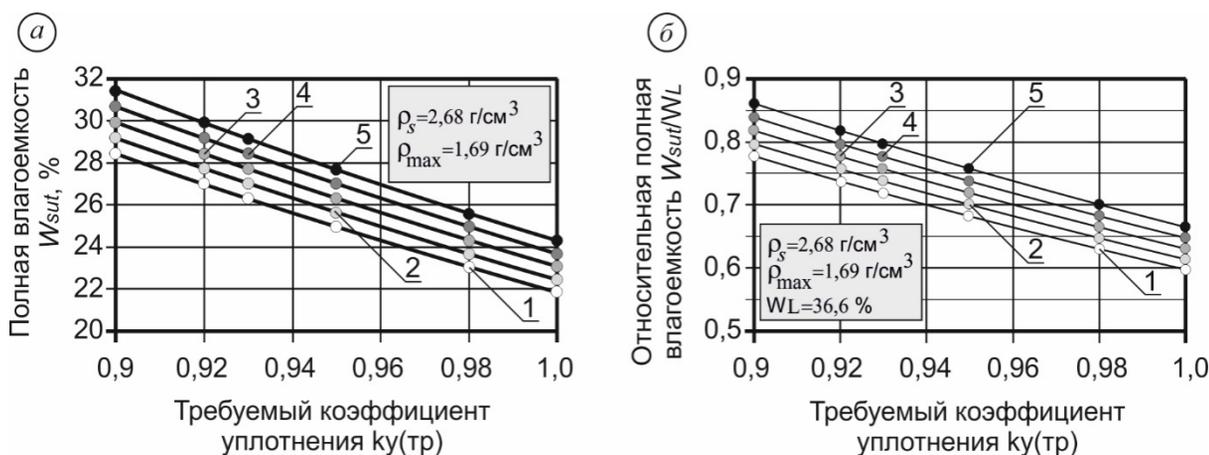


Рисунок 3 – Зависимость абсолютной и относительной полной влагоёмкости от коэффициента уплотнения:
 а – расчет по формуле (12);
 б – расчет по формуле (13);
 1–5 – при поправке на зимнее разуплотнение грунтов β , равной 0; 0,01; 0,02; 0,03 и 0,04 соответственно
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of absolute and relative total moisture capacity on the compaction coefficient:
 а – calculation according to formula (12);
 б – calculation according to formula (13);
 1-5 – when adjusted for winter decompression of soils β equal to 0; 0,01; 0,02; 0,03 and 0,04 respectively
 Source: compiled by the authors.

Тогда с учетом поправки на зимнее разуплотнение грунтов полная влагоёмкость в весенний расчетный период будет достаточно велика. В этом случае результат расчета по формуле (9) может иметь более высокое значение, чем расчетная влажность, вычисленная по зависимости (1). Значит, в этом случае определяющим будет расчет по формуле (1).

Кроме того, на выбор определяющего расчета существенное влияние оказывает влажность на границе текучести. Этот предел А. Аттеберга имеет высокие значения для суглинков тяжелых и глин, вследствие чего относительная полная влагоёмкость, рассчитанная по выражению (9), как правило, будет меньше расчетной влажности, найденной по формуле (1). Поэтому расчет по формуле (9) с большой вероятностью оказывается определяющим для суглинков тяжелых и глин. Супеси характеризуются сравнительно малой величиной влажности на границе текучести. Вследствие этого с большой вероятностью определяющим

расчетом будет вычисление расчетной влажности по формуле (1). Суглинки легкие обладают средними значениями влажности на границе текучести. Поэтому для суглинков легких сложно делать предположение о решающем значении формулы (1) или выражения (9) для определения расчетной влажности.

Предлагаемый способ определения расчетной влажности можно применять для определения параметров прочности и деформируемости грунтов (сцепления, угла внутреннего трения, модуля упругости и модуля деформации [16, 17, 18, 19]. Установленные механические параметры грунтов используются для расчета дорожных одежд как по нормативной методике, так и по модифицированным расчетам, к которым относятся методы, предложенные авторами [20, 21]. Таким образом, уточнение расчетной влажности грунта позволит повысить достоверность общепринятых и новых методов расчета дорожных одежд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В завершение статьи можно сделать заключение в виде выводов:

1. Предложен модифицированный способ вычисления расчетной влажности грунта рабочего слоя земляного полотна. Согласно этому способу нужно определить как расчетную влажность, так и относительную полную влагоемкость, значение которой выражено в долях от влажности на границе текучести. Расчетная влажность вычисляется по известной зависимости, регламентируемой ГОСТ Р 71404–2024. Формула для расчета относительного значения полной влагоемкости получена обратным решением зависимости, регламентируемой ГОСТ 22733–2016, для построения нулевого содержания воздуха. В это обратное решение введена поправка Ю.М. Васильева и А.С. Еремина, позволяющая учитывать разуплотнение грунта в зимний период, обусловленное замерзанием воды. Благодаря такой поправке учитывается, что в весенний расчетный период года, сопровождаемый оттаиванием, коэффициент уплотнения грунта меньше требуемого значения на величину этой поправки. После вычисления расчетной влажности и относительной полной влагоемкости их значения сравнивают. В качестве расчетной влажности выбирают наименьшее из этих двух величин.

2. Таким образом, выбор расчетной влажности основан на двух расчетах, один из которых является определяющим. С большой долей вероятности можно предполагать, что для суглинков тяжелых и глин определяющим расчетную влажность является расчет относительной полной влагоемкости. Это объясняется тем, что влажность на границе текучести таких грунтов имеет высокие значения. Поэтому относительная полная влагоемкость имеет сравнительно небольшие значения при требуемом коэффициенте уплотнения 0,95 и выше. Так как полная влагоемкость не может быть превышена, то расчетную влажность необходимо принимать равной относительной полной влагоемкости. Для супесей, наоборот, определяющим расчетом будет вычисление расчетной влажности по ГОСТ Р 71404–2024. Это объясняется невысокими значениями влажности на границе текучести. Поэтому полная влагоемкость супесей, как правило, больше влажности на границе текучести. В этом случае относительная полная влагоемкость будет больше единицы и больше, чем расчетная влажность, рассчитанная по ГОСТ Р 71404–2024.

3. Использование нашего предложения позволит избежать случаев, при которых расчетная влажность превышает полную влагоемкость, что противоречит физическим основам инженерной геологии. В связи с чем применение предложенного расчета или его аналогов следует считать обязательным при определении расчетной влажности. В противном случае вероятна физическая ошибка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Churilin V.S., Matvienko O.V., Efimenko V.N., Efimenko S.V. Regression models of irregular vertical displacement of a roadway cross section caused by frost heaving. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. 120 (4). Article no. 12009. DOI: 10.34910/MCE.120.9.
2. Чурилин В.С., Ефименко С.В., Ефименко В.Н., Сухоруков А.В., Дроздов Ю.В. Стандартизация расчётных характеристик глинистых грунтов Томской области для обеспечения качества проектирования автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 22(6). С.177–187. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-6-177-187>.
3. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Чурилин В.С. Моделирование напряжений и деформаций дорожных покрытий // Дороги и мосты. 2016. Т 36, № 2. С. 139–153.
4. Churilin, V., Efimenko S., Matvienko O., Bazuev V. Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving // *Matec web of conferences*. 2018. Vol. 216. 01011 DOI:10.1051/mateconf/201821601011.
5. Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Каримов Э.М., Мамажакыпова Г.Т. Прикладное значение спутниковой модели ТМРА при установлении нормы годового количества атмосферных осадков по дорожно-климатическим зонам на территории Юго-Западного Кыргызстана // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23, № 4. С. 147–158. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-147-158.
6. Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Баширова И.А. Особенности формирования информационного банка данных для уточнения границ дорожно-климатических подзон на территории ЯНАО // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24, № 6. С. 150–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-150-159.
7. Афиногенов О.П., Шаламанов В.А., Серякова А.А. Обеспечение качества земляного полотна автомобильных дорог на основе принципов регионального районирования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. Вып. 103. № 4. С. 106–110.
8. Конорев А.С., Мирончук С.А., Думенко В.А., Александрова А.И. Прогнозирование периода весеннего оттаивания грунта земляного полотна автомобильных дорог // Дороги и Мосты. 2022. Вып. 48. № 2. С. 43–58.

9. Еремин Р.А., Пудова Н.Г., Романов Д.Б. Пространственный анализ георадарных данных // Дороги и Мосты. 2023. Вып. 49. № 1. С. 145–157.

10. Еремин Р.А., Кулижников А.М. Опыт комплексных обследований дорожных одежд георадарами и установками ударного нагружения // Дороги и Мосты. 2021. Вып. 46. № 2. С. 100–124.

11. Кулижников А.М., Еремин Р.А., Пудова Н.Г., Зверев Е.О. Методические подходы к обнаружению ослабленных зон в дорожной одежде по динамическим и кинематическим признакам // Дороги и Мосты. 2022. Вып. 48. № 2. С. 82–97.

12. Киялбаев А.К., Алимгазин Б.Т., Абдыгаппаров К. Примеры определения расчётной влажности грунта в теле земляного полотна в условиях засушливого климата // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2016. Вып. 52. № 2. С. 31–38.

13. Киялбаев А.К., Сагыбекова А.О., Юн Д.С. О расчётной влажности грунта в рабочем слое земляного полотна: примеры расчета // Достижения науки и образования. 2018. Вып. 28. № 6. С. 8–11.

14. Craig R.F. Soil Mechanics. Seventh edition // Department of Civil Engineering, University of Dundee, UK. Published by Taylor & Francis e-Library, London and New York. 2004. 447 p.

15. Das B.M. Advanced soil mechanics // Third Edition. New York, Taylor & Francis. 2008. 567 p.

16. Алексиков И.С., Курдюкова Л.Е., Алексиков С.В. Прогнозирование физико-механических свойств грунтов земляного полотна // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2008. Вып. 12. С. 51–53.

17. Горячев М.Г. Оценка ожидаемых значений модулей упругости глинистых грунтов при строительстве земляного полотна автомобильных дорог // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 2 (24). С. 1–14.

18. Каленова Е.В., Горячев М.Г., Лугов С.В., Яркин С.В. Обеспечение требуемой прочности рабочей зоны земляного полотна при проектировании и строительстве дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. 2021. № 2(96). С. 13–15.

19. Ушаков В.В., Горячев М.Г., Кудрявцев А.Н. Учет природно-климатических условий эксплуатации автомобильных дорог для проектирования дорожных одежд // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2022. № 3(70). С. 68–73.

20. Александров А.С., Семенова Т.В. Совершенствование критерия Мора – Кулона для расчета дорожных одежд дорог с низкой интенсивностью движения // Вестник СибАДИ. 2024. № 21(5). С. 756–769. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>.

21. Александров А.С. Трехпараметрический критерий Мора – Кулона с эффектом Баушингера для расчета дорожных одежд // Строительная механика и конструкции. 2023. № 4 (39). С. 85–101. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.009.

REFERENCES

1. Churilin V.S., et al. Regression models of irregular vertical displacement of a roadway cross section caused by frost heaving. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 120(4): 12009. DOI: 10.34910/MCE.120.9.

2. Churilin V.S., Efimenko S.V., Efimenko V.N., Sukhorukov A.V., Drozdov Yu.V. Estimated performance standardization of clayey soils in the Tomsk region for the quality assurance in road construction. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2020; 22(6): 177–187. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-6-177-187>.

3. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Churilin V.S. Modelirovanie napryazhenij i deformatsij dorozhnyh pokrytij. *Dorogi i mosty*. 2016; 36 (2): 139–153. (In Russ.)

4. Churilin V., Efimenko S., Matvienko O., Bazuev V. Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. *Matec web of conferences*. 2018; 216. 01011. DOI:10.1051/mateconf/201821601011.

5. Efimenko V.N., Efimenko V.N., Karimov E.M., Mamagakipova G.T. TMPA satellite model applied for determination of annual precipitations in road-building climatic zones in southwest Kyrgyzstan. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2021; 23(4): 147–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-4-147-158>.

6. Efimenko V.N., Efimenko S.V., Bashirova I.A. Data bank for road-building climatic zones in Yamalo-Nenets Autonomous District. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2022; 24(6): 150–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-6-150-159>.

7. Afinogenov O.P., Shalamanov V.A., Seryakova A.A. Obespechenie kachestva zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog na osnove principov regional'nogo rajonirovaniya. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014; 103 (4): 106–110. (In Russ.)

8. Konorev A.S., Mironchuk S.A., Dumenko V.A., Aleksandrova A.I. Prognozirovaniye perioda vesennego ottaivaniya grunta zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog. *Dorogi i Mosty*. 2022; 48 (2): 43–58. (In Russ.)

9. Eremine R.A., Pudova N.G., Romanov D.B. Prostranstvennyj analiz georadarnyh dannyh. *Dorogi i Mosty*. 2023; 49 (1): 145 – 157. (In Russ.)

10. Eremine R.A., Kulizhnikov A.M. Opyt kompleksnyh obsledovaniy dorozhnyh odezhd georadarami i ustanovkami udarnogo nagruzheniya. *Dorogi i Mosty*. 2021; 46 (2): 100 – 124. (In Russ.)

11. Kulizhnikov A.M., Eremine R.A., Pudova N.G., Zverev E.O. Metodicheskie podhody k obnaruzheniyu oslablennyh zon v dorozhnoj odezhd po dinamicheskim i kinematischeskim priznakam. *Dorogi i Mosty*. 2022; 48 (2): 82–97. (In Russ.)

12. Kiyalbaev A.K., Alimgazin B.T., Abdygapparov K. Primery opredeleniya raschyotnoj vlazhnosti

grunta v tele zemlyanogo polotna v usloviyah zasushlivogo klimata. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvenno-gosudarstvenno stroitel'stva, transporta i arhitektury im. N. Isanova*. 2016; 52 (2): 31–38. (In Russ.)

13. Kiyalbaev A.K., Sagybekova A.O., YUn D.S. O raschyotnoj vlazhnosti grunta v rabochem sloe zemlyanogo polotna: primery rascheta. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2018; 28 (6): 8–1. (In Russ.)

14. Craig R.F. Soil Mechanics. Seventh edition. *Department of Civil Engineering, University of Dundee, UK*. Published by Taylor & Francis e-Library, London and New York. 2004: 447 p.

15. Das B.M. Advanced soil mechanics. *Third Edition*. New York. Taylor & Francis. 2008: 567 p.

16. Aleksikov I.S., Kurdyukova L.E., Aleksikov S.V. Prognozirovaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov zemlyanogo polotna. *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volograd State Technical University"*. 2008; 12: 51–53. (In Russ.)

17. Goryachev, M.G. Ocenka ozhidaemykh znachenij modulej uprugosti glinistyykh gruntov pri stroitel'stve zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2020; 2 (24): 1–14. (In Russ.)

18. Kalenova E.V., Goryachev M.G., Lugov S.V., YArkin S.V. Obespecheniye trebuemoj prochnosti rabochej zony zemlyanogo polotna pri proektirovaniy i stroitel'stve dorozhnykh odezhd. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2021; 2 (96): 13–15. (In Russ.)

19. Ushakov V.V. Goryachev M.G., Kudryavcev A.N. Uchet prirodno-klimaticheskikh usloviy ekspluatatsii avtomobil'nykh dorog dlya proektirovaniya dorozhnykh odezhd. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (MADI)*. 2022; 3(70): 68–73. (In Russ.)

20. Aleksandrov A.S., Semenova T.V. Improvement of Mohr-Coulomb criterion for designing pavements of roads of low traffic intensity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(5): 756–769. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>.

21. Aleksandrov A.S. Three-parameter mohr-coulomb criterion with the bauschinger effect for calculation of road pavements. *Structural mechanics and structures*. 2023; 4 (39): 85–101. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.009. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Александров А.С. Формирование цели, постановка задачи, написание основного текста. Участник приведённых в статье исследований.

Семенова Т.В. Общее редактирование. Подготовка материалов, оформление статьи. Участник приведённых в статье исследований.

Александрова Н.П. Выполнение расчетов и подготовка графических материалов. Участник приведённых в статье исследований.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandrov A.S. Formulation of the goal, setting the task, writing the main text. Participant of the research presented in the article.

Semenova T.V. General editing. Preparation of materials, article design. Participant of the research presented in the article.

Aleksandrova N.P. Performing calculations and preparing graphic materials. Participant of the research presented in the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-код: 7573-4997,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

Семенова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>,

SPIN-код: 6344-3503,

Author ID (Scopus): 57793795915,

e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

SPIN-код: 6893-9560,

Author ID (Scopus): 57191525817,

e-mail: nata26.74@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandrov Anatoly S. – Cand. of Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-code: 7573-4997,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

Semenova Tatiana V. – Cand. of Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>,

SPIN-code: 6344-3503,

Author ID (Scopus): 57793795915,

e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Aleksandrova Nataliya P. – Cand. of Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Road Construction and Operation, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

SPIN-code: 6893-9560,

Author ID (Scopus): 57191525817,

e-mail: nata26.74@mail.ru