

УДК 625.8

ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Горячев Михаил Геннадьевич д-р техн. наук, проф.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, kafedra_sed@mail.ru

Аннотация. Данная статья продолжает рассмотрение вопроса о предложении заимствовать требования к прочности земляного полотна, установленные в каталоге типовых дорожных одежд ФРГ, для проектирования дорожных одежд в России. Показано, что невозможно выполнить зарубежные требования к минимальному значению модуля деформации на поверхности земляного полотна, при использовании расчётных величин модулей упругости грунтов, применяемых для проектирования дорожных одежд. Аналитически установлены ориентировочные допустимые граничные значения оптимальной влажности глинистых грунтов в долях от предела текучести. Дана оценка нормативных допусков к оптимальной влажности глинистых грунтов и ожидаемых модулей упругости грунтов, которые могут быть обеспечены при строительстве земляного полотна, при использовании отечественных руководящих документов на проектирование дорожных одежд. Показано, что более объективным показателем контроля качества уплотнения земляного полотна являются не механические характеристики грунтов, например, модуль деформации или модуль упругости, а используемый в настоящее время в России коэффициент стандартного уплотнения.

Ключевые слова: дорожные одежды; земляное полотно; модуль упругости; модуль деформации; оптимальная влажность.

EVALUATION OF EXPECTED VALUES OF ELASTIC MODULES OF CLAY SOILS AT CONSTRUCTION OF THE SUBGRADE OF AUTOMOBILE ROADS

Goryachev Mikhail G., Dr. Sc., professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, kafedra_sed@mdi.ru

The abstract. This article continues to consider the proposal to borrow the requirements for the strength of the subgrade, established in the catalog of typical road pavements of Germany, for the design of pavements in Russia. It is shown that it is impossible to fulfill foreign requirements for the minimum value of the deformation modulus on the subgrade surface when using the calculated values of the soil elasticity moduli used to

calculate pavement. The approximate permissible boundary values of the optimum moisture content of clay soils in fractions of the yield strength have been analytically determined. The assessment of normative tolerances for the optimum moisture content of clay soils and the expected modulus of elasticity of soils, which can be provided during the construction of the subgrade, using domestic guidelines for the design of road pavements. It is shown that a more objective indicator of the quality control of compaction of the subgrade is not the mechanical characteristics of soils, for example, the deformation modulus or elastic modulus, but the standard compaction coefficient currently used in Russia.

Keywords: pavements; subgrade; deformation modulus; elastic modulus; optimal moisture.

Введение

Предложения по заимствованию зарубежных норм систематически появляются, в том числе в открытой печати [5, 6]. В ранее изданной работе [3] было показано, что формальное применение требований к прочности земляного полотна, содержащихся в каталоге типовых дорожных одежд ФРГ, неприемлемо для проектирования дорожных одежд по российским методикам. Более того, руководствуясь расчётными модулями упругости грунтов из российских норм [8, 9], даже на стадии строительства земляного полотна невозможно достичь минимальных значений модулей деформации, установленных в альбоме типовых дорожных одежд ФРГ. Также ошибочно применять расчётные характеристики материалов и грунтов, используемые при проектировании дорожных одежд, для оценки качества строительства.

Основная часть

Опираясь на отечественные нормативы в отношении допусков к оптимальной влажности грунтов при их уплотнении (табл. 1) [11] и взаимосвязи модулей упругости от влажности грунтов [8, 9], можно прогнозировать вероятные значения модулей упругости на поверхности земляного полотна у различных типов грунтов по завершению их уплотнения.

Таблица 1

Требования к влажности грунтов при строительстве земляного полотна

Вид грунта	Влажность, в долях от оптимальной, при требуемом коэффициенте уплотнения		
	1...0,98	0,95	0,90
Пески пылеватые	Не более 1,35	Не более 1,6	Не нормируется
Супеси лёгкие	0,8...1,25	0,75...1,35	0,7...1,6
Супеси пылеватые, суглинки лёгкие	0,85...1,15	0,8...1,2	0,75...1,4
Суглинки тяжёлые, глины	0,95...1,05	0,9...1,1	0,85...1,2

Примечание. Для песков непывеватых требования отсутствуют.

На практике в подавляющем большинстве случаев требуемый коэффициент стандартного уплотнения рабочего слое земляного полотна находится в диапазоне от 0,95 до 1,0 [10].

Верхние допустимые значения отклонений от оптимальной влажности установлены теоретически из уравнения неразрывности (баланса фаз) [2]

$$W = \frac{(100 - \Omega) \cdot \Delta_g}{\rho} - \frac{100 \cdot \Delta_g}{\delta_o}, \quad (1)$$

где ρ – требуемая плотность сухого грунта, т/м³;

δ_o – плотность частиц грунта, т/м³;

Δ_g – плотность воды, г/см³; $\delta_o=1,0$ т/м³;

Ω – объёмная доля грунтовых пор, заполненных воздухом, %;

W – влажность грунта, %.

Дадим аналитическую оценку нормативных допусков на отклонение содержания влаги в грунте от оптимальной влажности. Анализ несколько усложняет расхождения в классификации грунтов по различным источникам, включая руководящие документы, хотя решение по

гармонизации норм в части классификации грунтов ранее было опубликовано [1]. Объединение в одну группу супесей пылеватых и суглинков лёгких (по умолчанию песчанистых и пылеватых), а также суглинков тяжёлых (по умолчанию песчанистых и пылеватых) и глин всех разновидностей некорректно. Под супесью лёгкой следует понимать супесь песчанистую.

На графике (рис. 1), построенном по данным табл. 1, приведён общий вид изменения плотности сухого грунта от влажности. Шкала плотности сухого грунта выполнена в относительных единицах: за 1,0 принято максимальное значение плотности сухого грунта. Куполообразная кривая изменения значений плотности сухого грунта от влажности имеет различный темп снижения плотности от экстремума для различных типов грунтов. Так, наиболее пологое очертание кривая принимает для лёгких (песчанистых) супесей, а более выраженное падение плотности отмечается для тяжёлых суглинков и глин. Поэтому теоретически для супесей допустимо большее отклонение во влажности без существенной потери в плотности грунта. Такая теоретическая кривая следует из выражения (1). Предполагается, что подобное очертание куполообразной кривой соответствует результатам определения максимальной плотности на приборе СоюздорНИИ [4]. Однако процесс уплотнения грунта катками происходит иначе, чем на приборе СоюздорНИИ при вертикальном падении груза на грунт, находящийся в замкнутом пространстве, препятствующем свободному боковому смещению частиц. При приближении влажности грунта к границе текучести горизонтальное выдавливание грунта из-под вальцев уплотняющей техники идёт достаточно интенсивно.

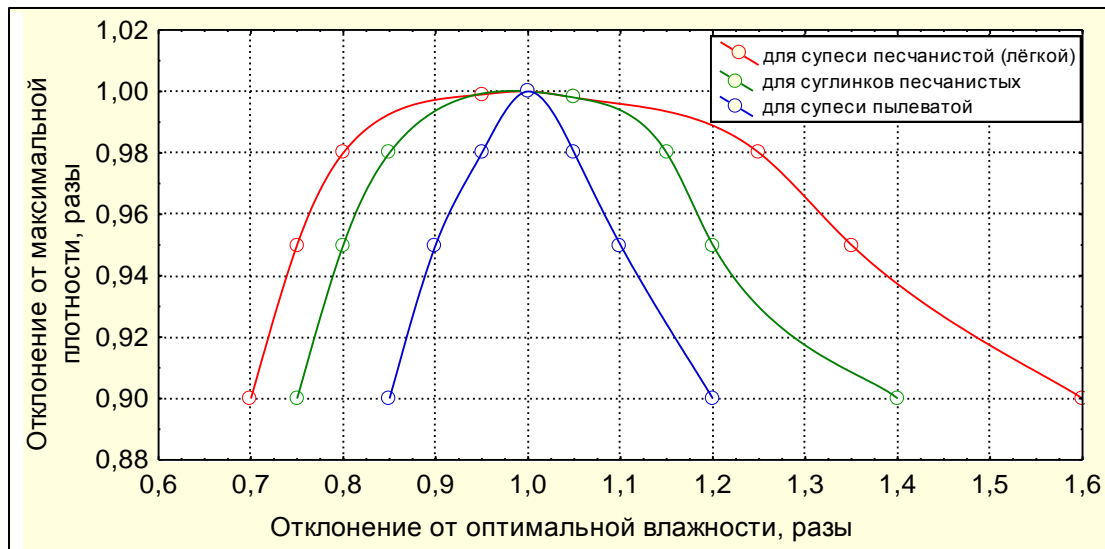


Рис. 1. Графическое представление изменения плотности сухого грунта от влажности (по данным табл. 1)

При пересечении куполообразной кривой (см. рис. 1) горизонталью, проведённой параллельно к оси оптимальной влажности, будет соблюдаться теоретическое равенство плотностей сухого грунта, а также коэффициентов стандартного уплотнения при разных значениях влажности (менее и более оптимальной влажности). По этой причине величины модулей упругости грунта при этих влажностях будут существенно различаться. Отсюда следует, что некорректно контролировать качество уплотнения грунта земляного полотна исключительно прочностными показателями в условиях широкого интервала на отклонение от оптимальной влажности.

В табл. 2 представлены сведения о статистических показателях различных глинистых грунтов по влажности, используя которые можно установить ориентировочные соотношения между оптимальной влажностью W_{opt} и влажностью грунта на границе текучести $W_{тек}$.

Таблица 2

Значения показателей грунтов по влажности

Тип грунта	Соотношение между влажностью оптимальной W_{opt} и на границе текучести $W_{тек}$ для грунтов по [7]	Влажность грунтов на границе текучести $W_{тек}$ по данным Бируля А.К. [12], %	Оптимальная влажность грунтов W_{opt} , %	Соотношение между влажностью оптимальной W_{opt} и на границе текучести $W_{тек}$ для грунтов, полученное по данным из столбцов 3 и 4
1	2	3	4	5
Супесь	$W_{opt} = 0,70 \cdot W_{тек}$	16...26	9...15	$W_{opt} = (0,56...0,58) \cdot W_{тек}$
Суглинок	$W_{opt} = 0,60 \cdot W_{тек}$	26...42	14...20	$W_{opt} = (0,48...0,54) \cdot W_{тек}$
Глина	$W_{opt} = 0,55 \cdot W_{тек}$	Более 42	18...24	$W_{opt} \leq 0,57 \cdot W_{тек}$

Отношение оптимальной влажности грунта к влажности грунта на границе текучести является частным случаем относительной влажности, от которой зависят показатели механических свойств грунтов, используемых при расчёте дорожных одежд.

Интервалам значений оптимальной влажности грунтов из табл. 2 соответствуют величины модулей упругости грунтов рабочего слоя

земляного полотна [8, 9], ожидаемые после завершения его уплотнения (табл. 3). Как следует из табл. 3, ожидаемые значения модулей упругости грунтов существенно ниже формально пересчитанных модулей деформации, взятых из каталога типовых дорожных одежд ФРГ, через ранее полученные соотношения [3].

Таблица 3

Ожидаемые значения модулей упругости на поверхности земляного полотна при строительстве (по результатам из табл. 2)

Тип грунта	Модуль упругости грунта, МПа
Супесь	46...59
Суглинок	72...108 и более
Глина	≥ 84

Теперь выполним исследование влияния допустимых отклонений в оптимальной влажности при уплотнении грунтов на величину ожидаемых модулей упругости грунта земляного полотна. Очевидно, что интервалы модулей упругости грунтов станут ещё шире. В табл. 4 даны отношения оптимальной влажности к влажности на границе текучести у различных грунтов (исключая пылеватые пески) с учётом разрешённых отклонений от определённой в лабораторных условиях величины оптимальной влажности (см. табл. 1). Обращает на себя внимание для супесей приближение допускаемой оптимальной влажности к границе текучести, а при коэффициенте стандартного отклонения равном 0,9 преодоление границы перехода из пластичного состояния в текучее состояние. Конечно, в табл. 4 приведены предполагаемые крайние значения смещения оптимальной влажности. Но даже в этом случае, очевидно, что верхние допуски на отклонение оптимальной влажности для супесей завышены.

Области множественных значений относительных влажностей в границах допустимых отклонений в зависимости от значений

коэффициентов уплотнения (коэффициентов стандартного уплотнения) продемонстрированы на рис. 2...6.

Таблица 4

Допускаемые значения оптимальной влажности грунтов при строительстве
земляного полотна

Вид грунта	Соотношение между влажностью допустимой при строительстве $W_{дон}$ и на границе текучести $W_{тек}$		
	1...0,98	0,95	0,90
Супеси лёгкие	$W_{дон} =$ (0,45...0,875)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,42...0,945)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,39...1,1)· $W_{тек}$
Супеси пылеватые	$W_{дон} =$ (0,48...0,805)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,45...0,84)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,42...0,98)· $W_{тек}$
Суглинки лёгкие	$W_{дон} =$ (0,41...0,69)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,38...0,72)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,36...0,84)· $W_{тек}$
Суглинки тяжёлые	$W_{дон} =$ (0,46...0,63)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,43...0,66)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,41...0,72)· $W_{тек}$
Глины	$W_{дон} =$ (0,52...0,60)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,495...0,63)· $W_{тек}$	$W_{дон} =$ (0,47...0,68)· $W_{тек}$

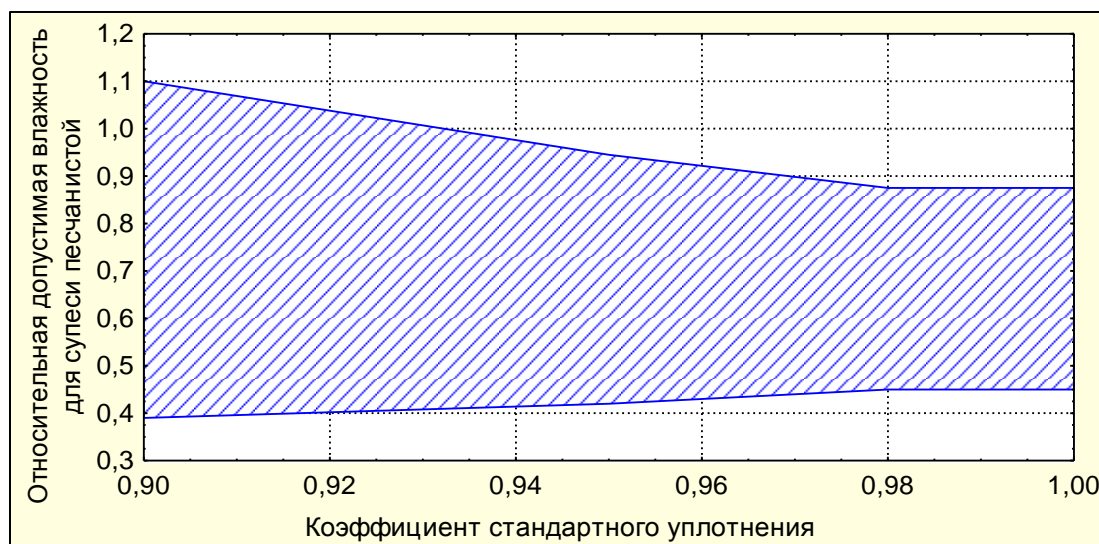


Рис. 2. Границы значений допустимой влажности при уплотнении супеси песчанистой (лёгкой), в долях от предела текучести

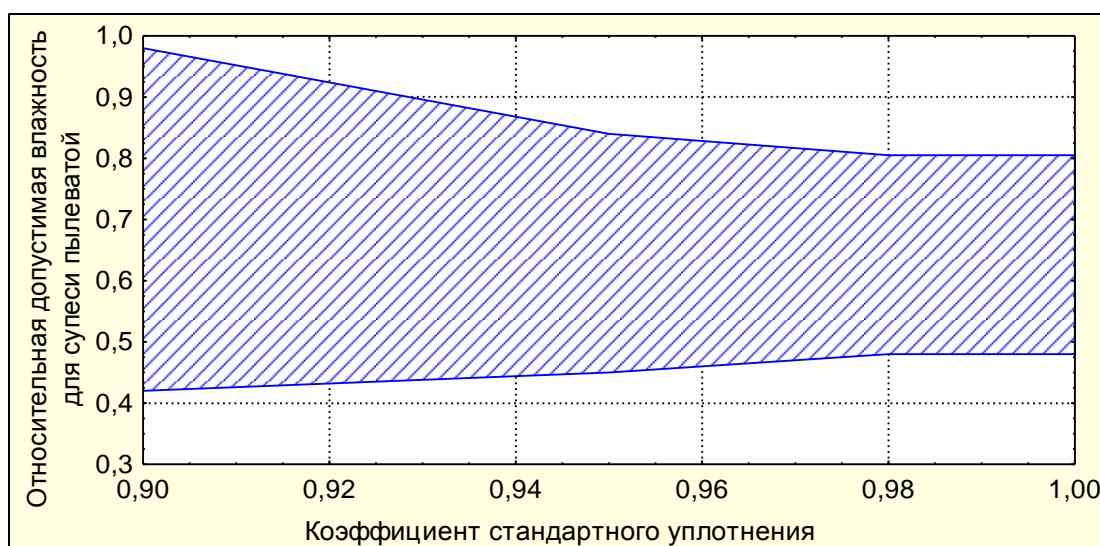


Рис. 3. Границы значений допустимой влажности при уплотнении супеси пылеватой, в долях от предела текучести

В табл. 5 приведены ожидаемые модули упругости грунта земляного полотна в зависимости от допустимой влажности из табл. 4. Ожидаемые модули упругости грунтов располагаются в самом широком спектре. Особенно это показательно у супесей и суглинков лёгких. Анализ осложняет то обстоятельство, что значения модулей упругости грунтов нормируются в диапазоне относительных влажностей от 0,5 до 0,95 [8, 9].

Поэтому в табл. 5 при относительной влажности за пределами диапазона 0,5...0,95 для модулей упругости грунтов указано «менее» или «более».

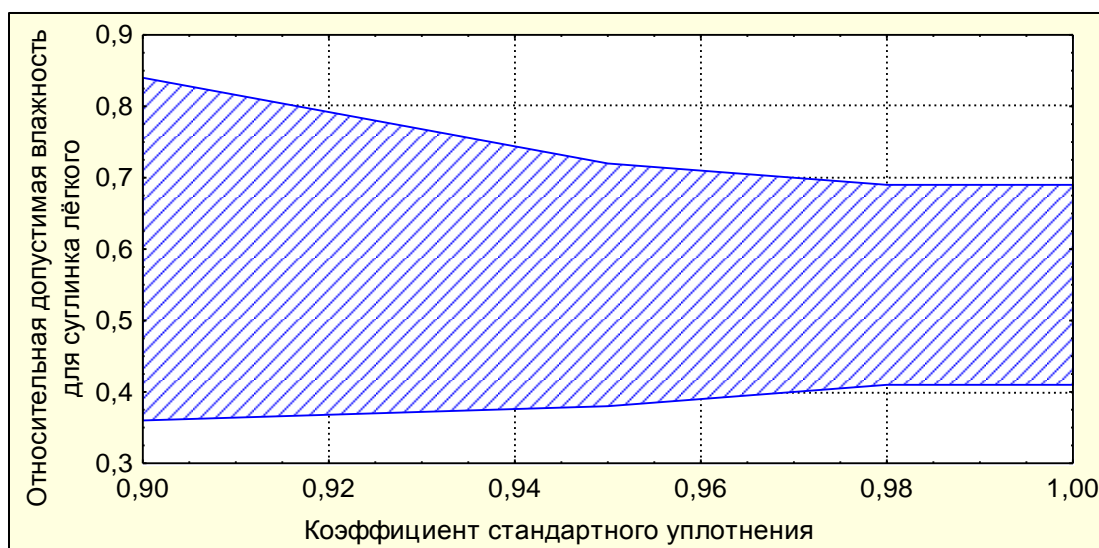


Рис. 4. Границы значений допустимой влажности при уплотнении суглинка лёгкого, в долях от предела текучести

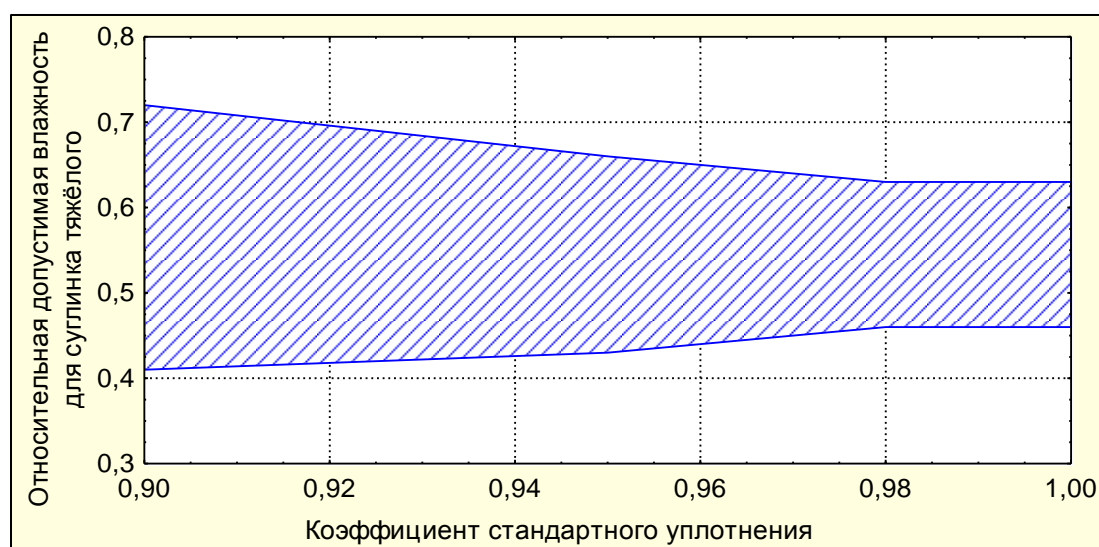


Рис. 5. Границы значений допустимой влажности при уплотнении суглинка тяжёлого, в долях от предела текучести

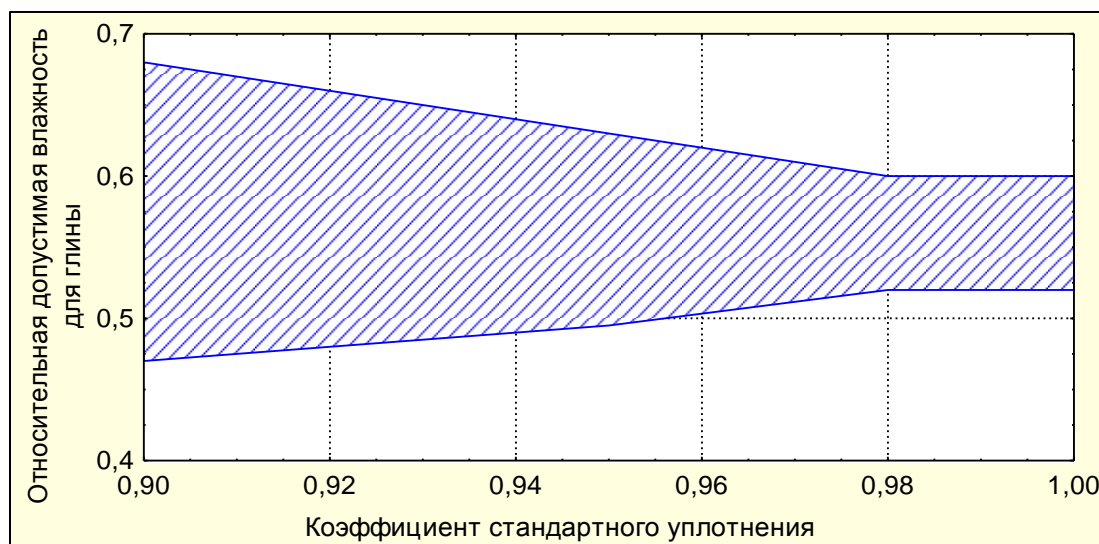


Рис. 6. Границы значений допустимой влажности при уплотнении глины, в долях от предела текучести

Таблица 5

Ожидаемые значения модулей упругости на поверхности земляного полотна при строительстве (по результатам из табл. 4)

Вид грунта	Модули упругости грунтов, МПа		
	1...0,98	0,95	0,90
Супеси лёгкие	41...70 и более	40...70 и более	Менее 40 и более 70
Супеси пылеватые	31...108 и более	28...108 и более	Менее 25 и более 108
Суглинки лёгкие	47...108 и более	39...108 и более	26...108 и более
Суглинки тяжёлые	59...108 и более	48...108 и более	38...108 и более
Глины	72...101	59...108 и более	45...108 и более

Заключение

При существующих правилах технологии производства строительных работ использование характеристик прочности и деформативной устойчивости грунтов для объективной оценки качества возведения земляного полотна недостаточно. Не подходят для этих целей расчётные показатели механических свойств грунтов, регламентируемые

действующими методиками проектирования дорожных одежд. Технически неприемлемо использовать для оценки качества уплотнения нормативы ФРГ в части минимальных значений модулей деформации на поверхности земляного полотна.

Список литературы

1. Ushakov, V.V. Setting Frequency of Works on the Arrangement of Wear and Protective Layers of Road Surfaces / V.V. Ushakov, V.P. Nosov, V.A. Yarmolinsky, M.G. Goryachev, S.V. Lugov // International Journal of Applied Engineering Research. - Volume 11. - Number 23. - 2016. – P. 1207-11214.
2. ВСН 166-70. Технические указания по возведению земляного полотна автомобильных дорог из переувлажнённых грунтов / Минтрансстрой. – М., 1970. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200042367> (дата обращения 26.04.2020).
3. Горячев, М.Г. К вопросу о заимствовании норм ФРГ на минимальный модуль деформации рабочей части земляного полотна для расчёта дорожных одежд в России / М.Г. Горячев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2020. - №1 (23).- С.3.
4. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности (с Поправкой). – М.: Стандартиформ, 2016. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200137273> (дата обращения 28.04.2020).
5. Кулижников, А.М. Требования к грунтам рабочего слоя / А.М. Кулижников // Мир дорог. – 2018. - №105. – С. 25-27.
6. Кулижников, А.М. Требования к деформационным характеристикам рабочего слоя земляного полотна / А.М. Кулижников // Дороги и мосты. – 2017. - №1 (37). – С. 81-92.
7. Методические рекомендации по технологии сооружения земляного полотна автомобильных дорог из переувлажнённых грунтов в зоне вечной мерзлоты / Мин-во транспортного стр-ва СССР, СоюздорНИИ. – М., 1971. – URL: <https://internet-law.ru/stroyka/text/47993/> (Дата обращения 24.04.2020).
8. ПНСТ 265-2018. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартиформ, 2018. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200158922>. (дата обращения 22.04.2020).
9. Проектирование нежестких дорожных одежд. ОДН 218.046-01 / Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства. – М., 2001. – URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200015514> (дата обращения 28.04.2020).
10. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (с Изменениями № 1, 2). – М., 2012. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095524> (дата обращения 22.04.2020).

11. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменением №1). – М., 2013. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095529> (дата обращения 22.04.2020).
12. URL: https://studopedia.ru/1_105390_harakternie-vlazhnosti-plastichnost-i-tekuchest-glinistih-gruntov.html (дата обращения 28.04.2020).

References

1. Ushakov V.V. Nosov V.P., Yarmolinsky V.A., Goryachev M.G., Lugov S.V. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 23, pp. 1207-11214.
2. VSN 166-70. Tekhnicheskie ukazaniya po vozvedeniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog iz pereuvlazhnyonnyh gruntov (VSN 166-70. Technical guidelines for the construction of subgrade roads from waterlogged soils), Moscow, 1970. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200042367> (04.26.2020).
3. Goryachev M. G. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*, 2020, no. 1 (23), p.3.
4. GOST 22733-2016. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimal'noj plotnosti (s Popravkoj) (GOST 22733-2016. Soils. Laboratory method for determining the maximum density (as amended)), Moscow, Standartinform, 2016. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200137273>. (04.28.2020).
5. Kulizhnikov A.M. *Mir dorog*, 2018, no. 105, pp. 25-27.
6. Kulizhnikov, A. M. *Dorogi i mosty*, 2017, no. 1 (37), pp. 81-92.
7. Metodicheskie rekomendacii po tekhnologii sooruzheniya zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog iz pereuvlazhnyonnyh gruntov v zone vечноj merzloty (Methodological recommendations on the technology of construction of the roadbed of roads from waterlogged soils in the permafrost zone), Moscow, 1971. – URL: <https://internet-law.ru/stroyka/text/47993>. (04.24.2020).
8. PNST 265-2018. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Proektirovanie nezhyostkih dorozhnyh odezhd (PNST 265-2018. General automobile roads. Flexible pavements design), Moscow, Standartinform, 2018. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200158922>. (04.22.2020).
9. Proektirovanie nezhyostkih dorozhnyh odezhd. ODN 218.046-01 (Flexible pavements design. ODN 218.046-01), Moscow, 2001. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200015514>. (04.28.2020).
10. SP 34.13330.2012. Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.05.02-85* (s Izmeneniyami № 1, 2) (SP 34.13330.2012. Car roads. Updated edition of SNiP 2.05.02-85* (with Changes N 1, 2)), Moscow, 2012. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095524>. (04.22.2020).
11. SP 78.13330.2012. Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 3.06.03-85 (s Izmeneniyami №1) (SP 78.13330.2012. Car roads. The updated version of SNiP

3.06.03-85 (with Amendment No. 1)), Moscow, 2013. – URL:

<http://docs.cntd.ru/document/1200095529>. (04.22.2020).

12. URL: https://studopedia.ru/1_105390_harakternie-vlazhnosti-plasticnost-i-tekuchest-glinistih-gruntov.html. (04/28/2020).

Рецензент: Ю.Э. Васильев, – д-р техн. наук, проф., МАДИ