4. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд / Минтранс России. – М.: Информавтодор, 2001. – 145 с.

5. *Афиногенов, А.О.* К вопросу назначения строительно-технологических свойств глинистых грунтов // Вестник КузГТУ. – 2009. – № 4. – С. 82–86.

6. *Афиногенов, О.П.* Строительные свойства грунтов верхней части земляного полотна на транспортных объектах Кузбасса / О.П. Афиногенов, В.А. Шаламанов, А.О. Афиногенов // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 4. – С. 45–48.

7. *Иванов, Л.В.* О неоднородности и методах изучения и оценки строительных свойств грунтов ледникового комплекса// Сб. науч. тр. /ЛИСИ. – Л., 1954. – Вып.18. – С. 159-189.

8. *Ефименко, С.В.* К уточнению дорожно-климатического районирования территорий на примере районов Западной Сибири / С.В. Ефименко. В.Н. Ефименко, А.О. Афиногенов // Вестник ТГАСУ. – 2014. - № 1. – С. 125-134.

Авторы статьи:

Афиногенов
Олег Петрович
канд. техн. наук, доц.
директор Кузбас. центра
дор. исследований
Email: afinogenov@smtp.ru

Шаламанов
Виктор Александрович
докт. техн. наук, проф.
каф. «Автомобильные
дороги» КузГТУ
Email: sva@kuzstu.ru

Серякова
Анастасия Анатольевна
ассистент каф. «Автомобильные
дороги» КузГТУ
Email: s.nastya_42@mail.ru

УДК 625.731.2:624.131.2

О.П. Афиногенов, А.О. Афиногенов, А.А. Серякова

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ НА ВЕЛИЧИНУ ИХ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

По предложению проф. Н.Н. Иванова, сопротивляемость грунта при проектировании автомобильных дорог принято оценивать величиной модуля упругости. Эта характеристика является основным показателем надежности земляного полотна. Причем, значительная изменчивость величины модуля упругости земляного полотна не позволяет рекомендовать его единые осредненные значения для дорожно-климатических зон в целом [1]. В связи с этим ряд авторов, например, проф. И.А. Золотарь считают оправданными попытки обосновать региональные значения этой величины (В.Н. Ефименко, В.А. Лукина, Е.И. Шелопаев, Н.Г. Шкулова, Р.З. Порицкий, В.П. Корюков и др.).

Установлено, что модуль упругости глинистого грунта существенно зависит не только от влажности, но и от степени уплотнения (В.М. Сиденко, О.Т. Батраков и др.). Поскольку эта зависимость также имеет ярко выраженный региональный характер, использование при проектировании дорог на территории Кемеровской области региональных норм степени (коэффициента) уплотнения грунтов [2]

Таблица 1. Значения показателей глинистых грунтов, использованных в эксперименте

Физико-механические показатели грунта	Дорожно-климатические районы			
	III.Р.3	III.Х.4	II.Х.1	II.Г.2
1. Содержание зерен 2-0,5 мм, % по массе	3,55	0,12	3,60	6,00
2. Число пластичности	13	13	11	14
3. Оптимальная влажность грунта, W_{opt}, % по массе	19,03	18,77	16,03	23,38
4. Максимальная плотность скелета грунта, г/см^3	1,73	1,76	1,79	1,63

Таблица 2. Изменение влажности глинистых грунтов в эксперименте

Уровни варьирования	Влажность грунта W, % по массе, для дорожно-климатических районов			
	III.Р.3	III.Х.4	II.Х.1	II.Г.2
Верхний, $x_{iв}$	20,93	20,65	17,63	25,72
Нижний, $x_{iн}$	17,13	16,89	14,43	21,04
Средний, x_{io}	19,03	18,77	16,03	23,38
Шаг варьирования, Δx_i	1,9	1,88	1,6	2,34

Таблица 3. Зависимости статического модуля упругости глинистого грунта от его влажности W (в %) и степени уплотнения $K_у$

Дорожно-климатический район	Зависимости $E_у = f(W, K_у)$, МПа
III.Р.3	$E_{у3} = - 1832,55 - 561,22\ W + 3655K_у + 4535,33\ W^2 - 1564K_у^2 - 1429,32K_уW$
III.Х.4	$E_{у4} = - 3330,83 - 2028,56\ W + 6885,5K_у + 16088,2\ W^2 - 2800K_у^2 - 4815,38K_уW$
II.Х.1	$E_{у1} = - 2557,28 - 2861,51W + 5434,4K_у + 22454,75\ W^2 - 2116K_у^2 - 5240,17K_уW$
II.Г.2	$E_{у2} = - 4183,92 + 260,48\ W + 8092,2K_у - 3475,88\ W^2 - 3916K_у^2 + 881,09K_уW$

должно сочетаться с применением соответствующих значений модуля упругости грунта.

Имеющиеся данные о характеристиках грунтов региона [3] были получены для фиксированных значений коэффициента уплотнения и требуют уточнения. В связи с этим были выполнены соответствующие лабораторные исследования. В качестве функции отклика принят статический модуль упругости грунта $E_у$, варьируемых параметров - его влажность W и коэффициент уплотнения $K_у$. Эксперимент выполнен на трех уровнях варьирования факторов.

Испытание образцов грунтов осуществлено по методике, регламентированной ВСН 46-83, для этого из верхних слоев земляного полотна строящихся автомобильных дорог (на глубине, равной 1/3 слоя) отбирались грунты, имеющие значения основных характеристик, близкие к типичным (усредненным). В табл. 1 приведены значения показателей использованных в эксперименте глинистых грунтов. Дорожно-климатическое районирование принято по В.Н. Ефименко [4].

Как показывает анализ фундаментальных работ по грунтоведению и результатов многолетних исследований ТГАСУ, главным следует считать не точное соответствие показателей, а отбор проб в конкретном дорожно-климатическом районе (что позволяет учесть региональные особенности грунта).

Испытания выполнены в соответствии с ортогональным планом второго порядка. Уровни варьирования факторов приведены в табл. 2. Для выполнения условий табл. 1 принимали значения влажности грунта по табл. 2.

Для оценки результатов выполнена проверка воспроизводимости эксперимента (однородности дисперсий). Поскольку в каждой точке плана имелось одинаковое число опытов, использовали критерий Кохрена. Также была выполнена проверка каждой полученной математической модели на адекватность, для чего вычисляли остаточную сумму квадратов отклонений опытных значений функции отклика от ее расчетных значений, общую дисперсию (дисперсию воспроизводимости), опытное и теоретическое значение критерия Фишера. Полученные математические модели с вероятностью не менее 95% являются адекватными.

В результате обработки данных получены зависимости статического модуля упругости грунта от его влажности и степени уплотнения (табл. 3). Следует отметить несколько большее влияние на величину модуля упругости коэффициента уплотнения (по сравнению с влажностью), но ситуация могла бы измениться, если увеличить диапазон варьирования влажности.

Оценить влияние влажности и коэффициента уплотнения грунта на его деформативные свойства можно по рис. 1 и 2, построенным для дорожно-климатического района III.Р.3. Для других районов характер зависимостей аналогичен.

Полученные зависимости справедливы только в пределах варьирования параметров, использованных в эксперименте (см. табл. 2). Несмотря на то, что они не имеют физического смысла, для практических целей вполне пригодны и статистически достоверны.

Анализ зависимостей модуля упругости от влажности и степени уплотнения указывает на весьма большое влияние рассматриваемых факторов (особенно коэффициента уплотнения).

Используя полученные зависимости, на основе исследований связи динамического и статического модулей упругости грунта, выполненных проф. Ю.М. Яковлев и др., можно определить расчетные значения динамического модуля упругости ($E_д$). Уточним, что при проектировании автомобильных дорог принято под динамическим модулем упругости понимать значение модуля упругости, полученное в результате испытания материала кратковременной нагрузкой [5].

Определением соотношения модулей упругости при кратковременной и длительной нагрузке ($E_{ст}$) занимались многие специалисты (Ю.М. Яковлев, П.И. Теляев, С.Р. Месчан, Н.Д. Красников, А.М. Шак и др.). Б.С. Радовский, А.С. Супрун, И.И. Козаков [6] рекомендовали для грунтов земляного полотна автомобильных дорог принимать данные проф. Ю.М. Яковлева [5]. Для глинистых грунтов соотношение $E_д/E_{ст}$ зависит от относительной влажности грунта и колеблется от 1,25 до 1,75.

Однако, несмотря на довольно подробные исследования динамики дорожных одежд, конкретные рекомендации по назначению значений расчетных модулей упругости глинистых грунтов $E_д$ отсутствуют (кроме норм ОДН 218.046-2001и ранее действующего ВСН 46-83). Причем, из анализа фундаментальных работ по грунтоведению можно вполне обоснованно предположить, что соотношение $E_д/E_{ст}$ так же должно носить региональный характер. В связи с отмеченным, были выполнены измерения динамических модулей упругости с параллельным определением коэффициента уплотнения грунта объемно-весовым методом (по ГОСТ 5180-84, ГОСТ 22733-2002) при строительстве автомобильной дороги I категории «Новосибирск – Ленинск-Кузнецкий – Кемерово –

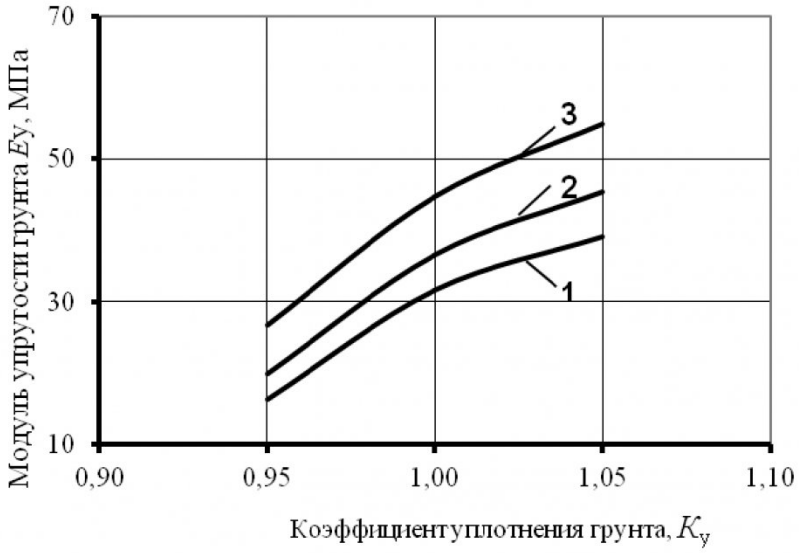

Рис. 1. Зависимость модуля упругости от коэффициента уплотнения глинистого грунта для дорожно-климатического района III.Р.3: 1 - W = 17,13%; 2 - W = 19,03%; 3 - W = 20,93%

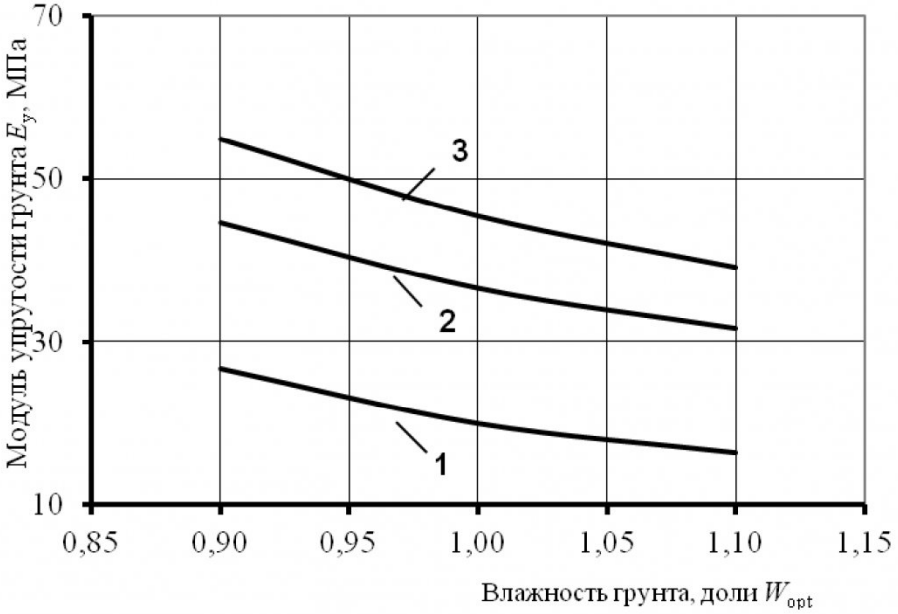

Рис. 2. Зависимость модуля упругости от влажности глинистого грунта для дорожно-климатического района III.Р.3: 1 - K_y = 0,95; 2 - K_y = 1,0; 3 - K_y = 1,05

Юрга на участке Ленинск-Кузнецкий – Кемерово, км 295 – км 323,5» (климатический район III.Р.3).

Зафиксированная влажность грунта изменялась в пределах 18,6-20,2% (отличается от оптимальной влажности на 2,9-5,2%). Измерения динамического модуля упругости производили портативной установкой динамического нагружения ПДУ-МГ4 «Удар» (прибор внесен в Государственный реестр средств измерений, регистрационный номер 45397-10). Основная погрешность измерения модуля упругости прибором - не более 5%. Установка измеряет модуль упругости материала слоя толщиной 0,15-0,20 м.

Результаты измерений приведены на рис. 3 (линия 1). Там же помещены результаты расчета статического модуля упругости по формуле из табл. 3 для дорожно-климатического района III.Р.3 при влажности 19,15% (линия 2). Сопоставление результатов позволяет установить, что соотношение $E_д/E_{ст}$ находится в пределах 1,3-1,43. В целом полученный результат близок к опубликованному в работе [6] для относительной влажности $W/W_т$ = 0,6. В нашем случае оно составило 0,59.

Отметим, в наших экспериментах установлен «длительный модуль упругости» ($E_у$). Анализ работ, посвященных исследованию влияния скорости нагружения дорожных одежд на величину модуля упругости материалов, позволил установить, что условия проведения экспериментов позволяют без особой погрешности принять значения $E_у$ равными $E_{ст}$ [6]. Применяя значения полученных соотношений $E_д/E_{ст}$ или данные проф. Ю.М. Яковлева, можно назначить расчетные значения модуля упругости грунтов $E_д$ для различных дорожно-климатических районов Кемеровской области.

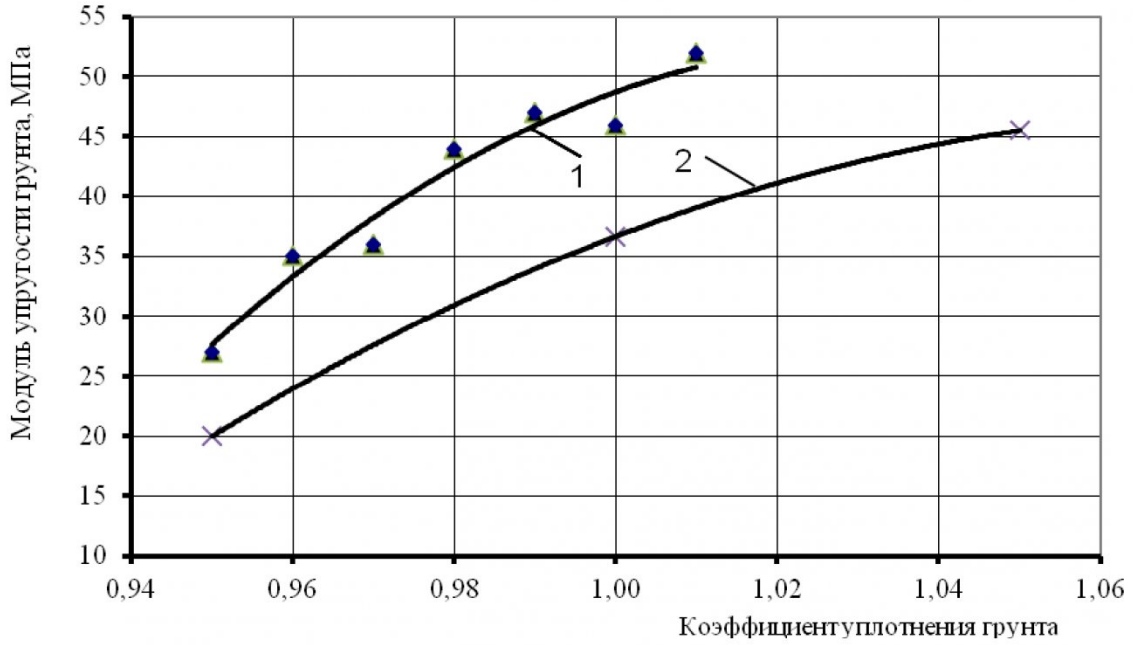

Рис. 3. Зависимость модуля упругости и коэффициента уплотнения глинистых грунтов (объект в районе III.Р.3): 1 - измеренные значения динамического модуля упругости $E_д$; 2 - рассчитанные на основе лабораторных испытаний значения статического модуля упругости $E_{ст}$

Сравнение рассчитанных по формулам табл. 3 значений $E_д$ с рекомендуемыми ОДН 218.046-2001 показало, что они ниже на 20-35% и близки к значениям, рекомендованным в работах кафедры автомобильных дорог ТГАСУ [3]. Предлагаемые региональные зависимости для определения модуля упругости глинистых грунтов могут способствовать повышению качества проектов дорожных одежд автомобильных дорог на территории Кузбасса

.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Золотарь, И.А.* Повышение надежности автомобильных дорог/ И.А. Золотарь, В.К. Некрасов, С.В. Коновалов и др. – М.: Транспорт, 1977. – 183 с.

2. *Афиногенов, О.П.* Обоснование региональных норм степени уплотнения глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог / О.П. Афиногенов, В.А. Шаламанов, А.О. Афиногенов // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 4. – С. 48–51.

3. *Ефименко, С.В.* Обоснование расчетных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд автомобильных дорог (на примере районов Западной Сибири): Дис. … канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 217 с.

4. *Ефименко, В.Н.* Дорожно-климатическое районирование Кемеровской области // Опыт обеспечения эффективности дорожного комплекса Кузбасса: Сб. науч. тр. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1997. – С. 62-66.

5. *Иванов, Н.Н.* Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Н.Н. Иванов, Я.А. Калужский, М.Б. Корсунский и др. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.

6. *Радовский, Б.С.* Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей/ Б.С. Радовский, А.С. Супрун, И.И. Козаков. – Киев: Будивэльнык. – 1989. – 168 с.

Авторы статьи:

Афиногенов
Олег Петрович
канд. техн. наук, доц.,
директор Кузбас. центра
дорожных. Исследований
Email: afinogenov@smtp.ru

Афиногенов
Алексей Олегович,
канд. техн. наук,
нач. лаб. Кузбас. центра
дорожных . исследований
Email: afinogenov@smtp.ru

Серякова
Анастасия Анатольевна
ассистент, каф. «Автомобильные
дороги» КузГТУ
Email: s.nastya_42@mail.ru