УДК 625.8

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

Инженер **И.П. Резяпкин**,
инженер **Д.Е. Ерченко**,
канд. техн. наук **А.В. Мошенжал**
(ООО «Миаком СПб»)
Конт. информация: from.work055@Gmail.com;
dina@s-impulse.org;
a.moshenzhal@gmail.com

Работа, представленная в данной статье, является продолжением исследований по контролю качества выполненных строительных работ в части уплотнения конструктивных слоев дорожных одежд и подстилающих грунтов. В качестве контролируемого параметра принят модуль упругости грунтов.

Предложен оптимизированный подход к выполнению контроля качества уплотнения грунтов в процессе строительства путем сравнения величин проектных значений общих модулей упругости с фактически измеренными на строительной площадке. Впервые представлены номограммы для определения теоретических (проектных) значений общих модулей упругости. Данные номограммы адаптированы под совместное применение с малогабаритными установками динамического нагружения, с помощью которых определяются фактические значения общих модулей упругости.

Рассмотрены два принципиальных случая – новое строительство и реконструкция – нашедших отражение в построенных номограммах. Представлены рекомендации и разъяснения по применению методики, а также границы ее применимости и возможные способы устранения выявленных несоответствий в период строительства. Обозначены ключевые направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: *дорожные одежды, модуль упругости, малогабаритные установки динамического нагружения, уплотнение грунтов.*

Введение

Надежность и безопасность транспортных объектов в процессе всего периода их эксплуатации напрямую зависит от качества разработанного проекта и выполненных строительных работ. Нередко возни-

кают ситуации, когда грамотно выполненный проект не удается успешно реализовать на практике и, наоборот, благодаря опыту инженеров-строителей на месте работ устраняются недоработки проекта. Подобные ситуации могут быть обусловлены многими причинами. Одной из них является несвязанность величин деформационных или прочностных параметров, учитываемых при проектировании, и величин, контролируемых на стадии строительства. Так, например, в процессе проектирования дорожной одежды выполняются расчеты по критерию прочности по упругому прогибу в соответствии с требованиями [**1**], результатом которых является определение толщины конструктивных слоев и их модули упругости. Логично предположить, что для обеспечения должного уровня строительных работ, необходимо выполнить контроль качества уплотнения материалов конструктивных слоев, т.е. достичь заложенных в проекте величин толщин и модулей упругости. Если в процессе строительства вопрос, касающийся толщины слоев в принципе решается, то взамен контроля модуля упругости выполняется контроль коэффициента уплотнения с помощью прибора Союздорнии. Как отмечалось ранее [**2**, **3**], данный способ имеет ряд недостатков, что противоречит современным требованиям надежности и безопасности, а также условиям достаточно сжатых сроков, отводимых на производство строительных работ. Таким образом, можно констатировать, что контроль на стадии строительства выполняется по величине, косвенно отражающей качество выполненных работ.

На сегодняшний день для контроля модуля упругости, как одной из основных величин, отражающих соответствие построенных конструктивных слоев дорожных одежд проекту, существует два основных способа: традиционные штамповые испытания и при помощи установок динамического нагружения.

Первый способ, как отмечалось в [**2**, **4**], отличается сложностью и трудоемкостью, что связано с монтажом тяжелого оборудования, специальной подготовкой грунтов к испытаниям, затратами времени на изучение характера осадки, что не всегда приемлемо при сжатых сроках выполнения строительных работ. Реализация второго способа возможна, например, с помощью малогабаритных установок динамического нагружения (**рис. 1**).

Подобные установки позволяют выполнять измерения при строительстве различных сооружений (автомобильные дороги, водопропускные трубы, армогрунтовые конструкции), контролировать качество уплотнения обратных засыпок при строительстве мостов и т.д. Но, к сожалению, на современном этапе для малогабаритных установок ди-

намического нагружения отсутствует методика проведения оперативного контроля качества устройства слоев основания дорожной одежды, выполняемая путем сопоставления проектного и измеренного модулей упругости [**2-4**].

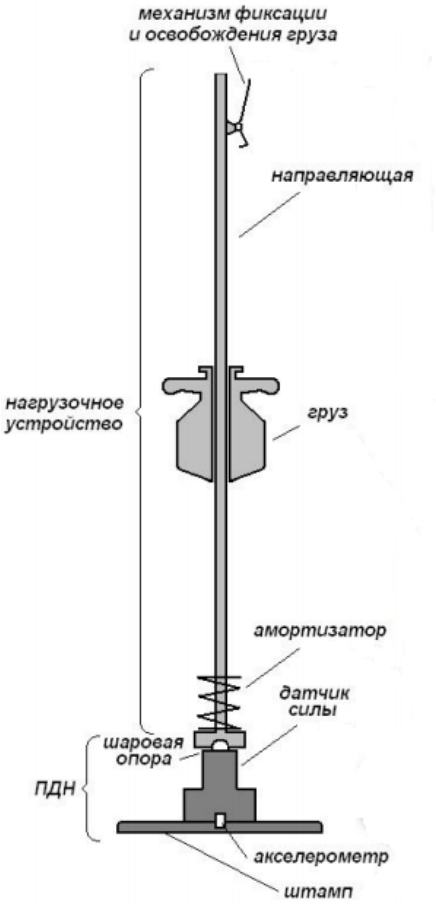

Рис. 1. Общая (принципиальная) схема малогабаритной установки динамического нагружения:
ПДН – плита динамического нагружения

Оптимизированный подход к выполнению контроля качества уплотнения грунтов в процессе строительства

Как отмечалось ранее, за основной критерий оценки качества уплотнения грунтов земляного полотна (тела насыпи) и конструктивных слоев дорожных одежд принято обеспечение требуемой величины упругого прогиба, которое проверяется путем сопоставления фактически измеренных общих модулей упругости грунтов в период строительства $E^i_{\text{стр}}$ с величинами, удовлетворяющими условиям надежной эксплуатации автомобильных дорог E^i_T, т.е. с заложенными на стадии проектирования, при этом, очевидно, должно выполняться условие (**1**):

$$E^i_{\text{стр}} \geq E^i_T \quad . \qquad (\mathbf{1})$$

В качестве зависимостей для определения общего модуля упругости двухслойной модели использовались зависимости из [**5**, **6**].

С целью повышения удобства использования предлагаемой методики на строительном объекте по приведению многослойных конструкций к двухслойным, авторами данной статьи были разработаны номограммы (**рис. 2-4**), адаптированные под применение малогабаритных установок динамического нагружения типа ПДУ-МГ4 «Удар». Номограммы построены для двух случаев – нового строительства и реконструкции. Обоснование такого разделения изложено в [**4**].

В качестве исходных данных в случае нового строительства принято следующее: толщина верхнего слоя $h_в$, модули упругости нижнего $E_н$ и верхнего $E_в$ слоев, а для реконструкции – те же параметры, а также и толщина нижнего слоя $h_н$.

Теоретические значения общих модулей упругости E^i_T для контролируемых групп слоев определяются на основе проектных решений, а также при помощи номограмм, представленных ниже (**рис. 2-4**).

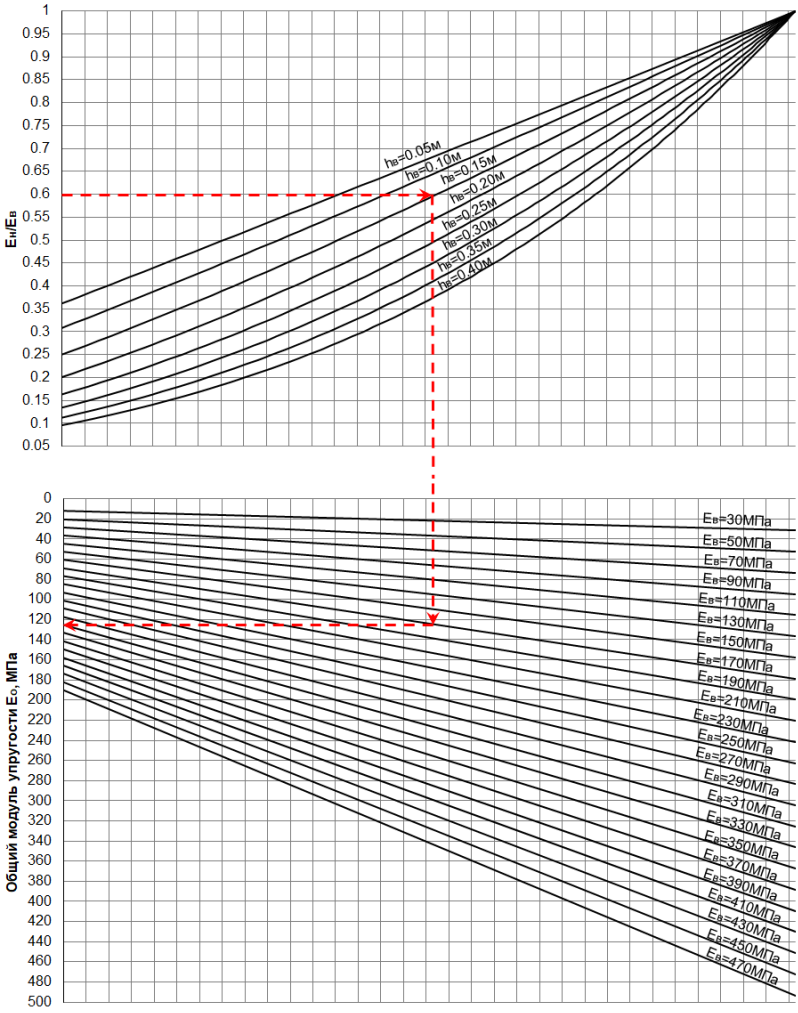

Рис. 2. Номограмма для определения теоретических значений общего модуля упругости для нового строительства

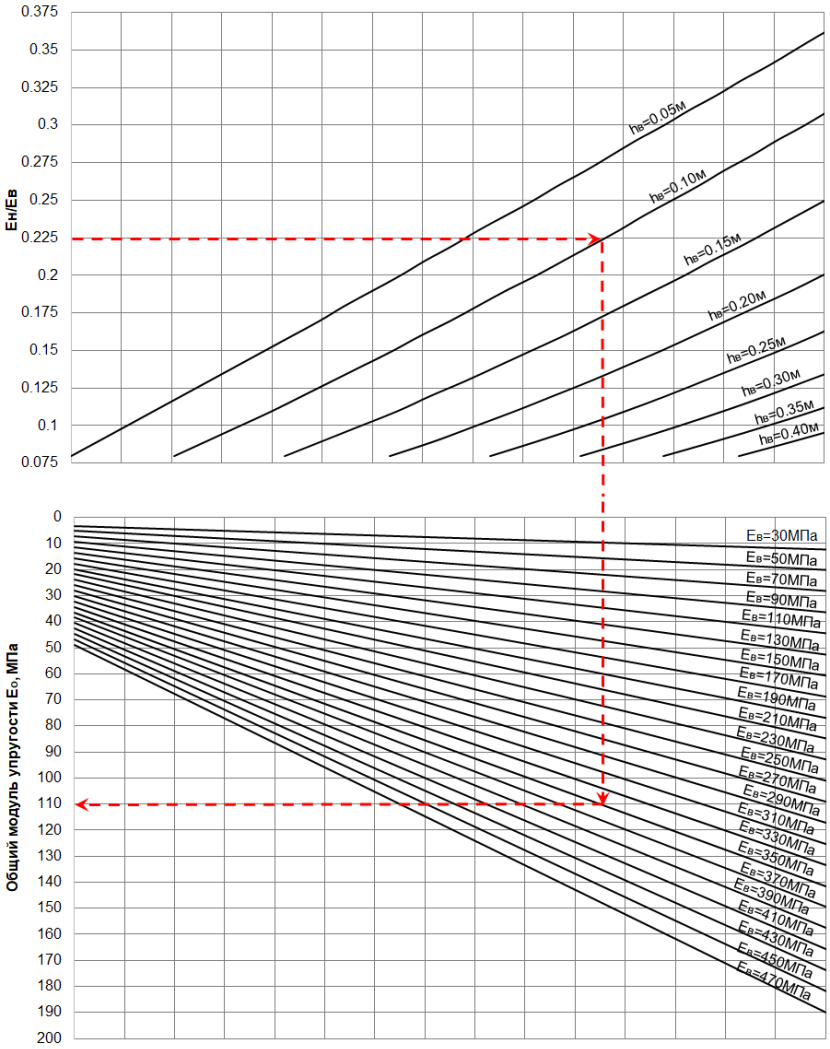

Рис. 3. Номограмма (увеличенная) для определения теоретических значений общего модуля упругости для нового строительства

$E_о$ – общий модуль упругости группы слоев, МПа
$E_н$ – модуль упругости нижнего слоя, МПа;
$E_в$ – модуль упругости верхнего слоя, МПа;
$h_в$ – толщина верхнего слоя, м;
$h_н$ – толщина нижнего слоя, м

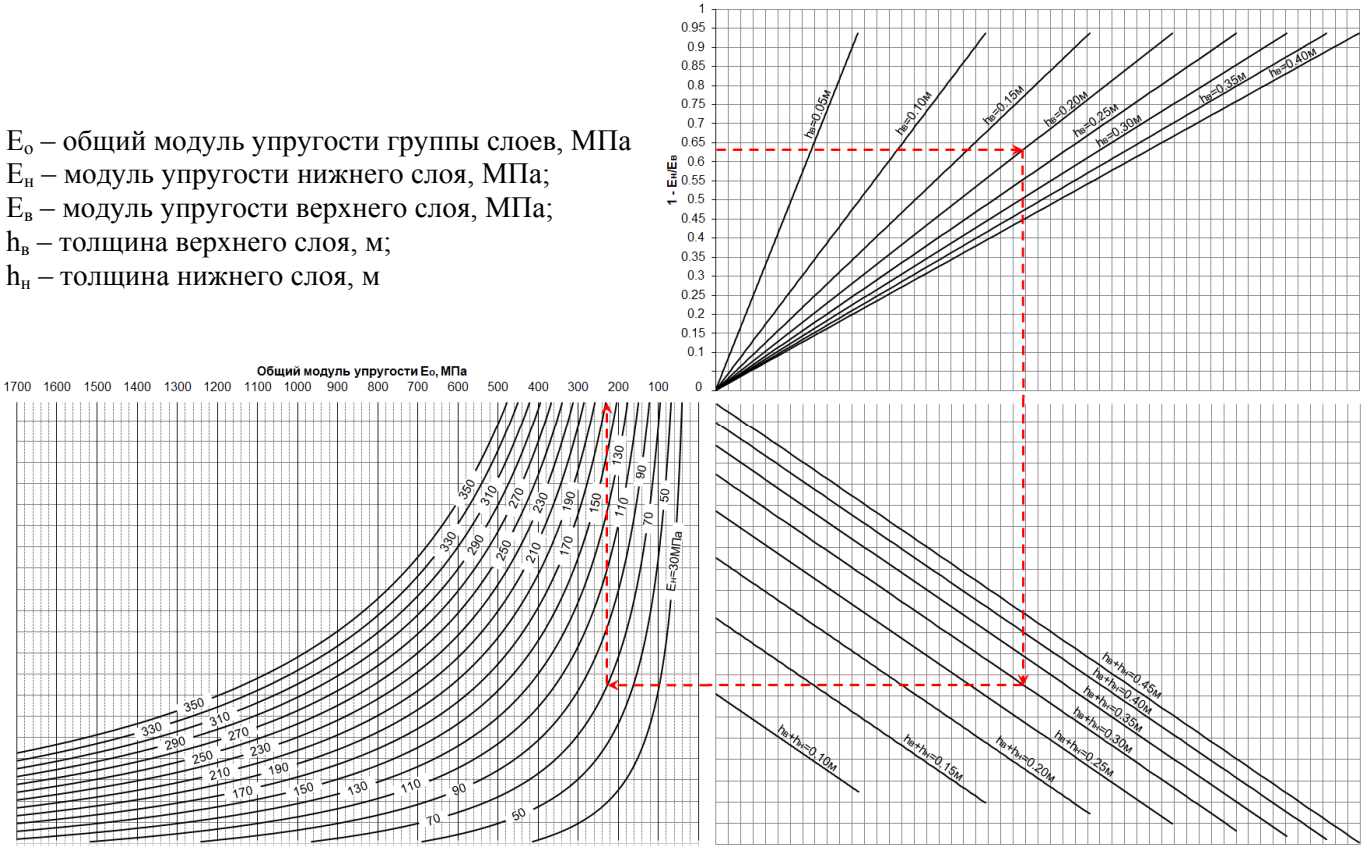

Рис. 4. Номограмма для определения теоретических значений общего модуля упругости для реконструкции

Представленные номограммы являются сетчатыми с равномерными шкалами по осям координат [**7**] и построены на основе уравнений:

для нового строительства (**рис. 2, 3**):

$$E_{общ}^{(i)} = \frac{\left[1.05 - 0.1\frac{h}{d_{шт}}\left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_н}{E_в}}\right)\right]E_в}{0.71\sqrt[3]{\frac{E_н}{E_в}}\,\mathrm{arctg}\left(\frac{1.35h_э}{d_{шт}}\right) + \frac{E_в}{E_н}\frac{2}{\pi}\,\mathrm{arctg}\left(\frac{d_{шт}}{h_э}\right)}, \qquad (2)$$

$$\frac{h_э}{d_{шт}} = \frac{2h}{d_{шт}}\sqrt[3]{\frac{E_в}{6E_н}}$$

где

h – толщина слоя, м;

$d_{шт}$ – диаметр нагруженной площади (плиты нагружения), м;

$E_н$ – общий модуль упругости нижнего слоя, МПа;

$E_в$ – модуль упругости верхнего слоя, МПа;

для реконструкции (**рис. 4**):

$$E_{общ} = \frac{E_н}{\frac{2}{\pi}\left[\mathrm{arctg}1.5\frac{(h_в + h_н)}{d_{шт}} - \left(1 - \frac{E_н}{E_в}\right)\mathrm{arcrg}1.5\frac{h_в}{d_{шт}}\right]}, \qquad (3)$$

где

$E_н$ – модуль упругости нижнего слоя, МПа;

$h_в$ – толщина верхнего слоя, см;

$h_н$ – толщина нижнего слоя, см;

$d_{шт}$ – диаметр нагруженной площади (плиты нагружения), см;

$E_в$ – модуль упругости верхнего слоя, МПа.

Относительная погрешность вычислений, произведенных по исходным зависимостям (**2**, **3**) и по представленным номограммам, не превышает 1 %, что вполне приемлемо для выполнения данных расчетов.

Фактические значения модулей упругости $E_{стр}^{i}$ определяются при помощи малогабаритных установок динамического нагружения.

В качестве малогабаритной установки динамического нагружения может использоваться оборудование, имеющее в своей конструкции датчик измерения силы и датчик измерения перемещения (**рис. 1**). Подобное оборудование предназначено для измерения модуля упругости на основе прямых измерений амплитуды перемещения штампа и ударной силы, действующей на круглый жесткий штамп.

Диапазон измерений силы при помощи малогабаритной установки динамического нагружения: 0,1 – 19,0 кН.

Диапазон измерений перемещения штампа малогабаритной установки динамического нагружения: 50 – 9999 мкм.

Для определения контролируемых теоретических величин E_T^i значения модулей упругости назначаются в соответствии с типом грунта, заложенного в проектной документации на основе данных лабораторных испытаний или нормативных значений, представленных в [**1**].

Границами применимости предлагаемой методики является следующее:

1. В каждом случае с целью определения использования конкретной номограммы (**рис. 2-4**) необходимо выполнить тестовое испытание подстилающего грунта. Если значение модуля упругости подстилающего грунта выше значения нижнего слоя конструкции дорожной одежды, то необходимо использовать для первой пары слоев номограмму, представленную на **рис. 4**. Если значение модуля упругости подстилающего грунта ниже значения модуля первого слоя дорожной одежды снизу, то необходимо использовать номограммы, представленные на **рис. 2** или **рис. 3**.
2. Значения модулей упругости контролируемых конструктивных слоев дорожной одежды и подстилающего грунта (земляного полотна) должны находиться в диапазоне от 30 до 370 МПа.
3. Толщины контролируемых конструктивных слоев должны быть не более 45 см.
4. Общий модуль упругости определяется для каждой группы слоев.
5. Предлагаемая методика также применима для нового строительства и для реконструкции армогрунтовых подпорных стен, в том числе и для области пристенного дренажа, но с некоторыми ограничениями. В данной области точки исследований допускается располагать не ближе чем на два диаметра плиты малогабаритной установки динамического нагружения от ее края до задней поверхности облицовочных блоков, т.е. $l \approx 2d_{\text{шт}} = 0{,}60$ м при условии однородности материала пристенного дренажа.
6. При устройстве насыпи на бетонном фундаменте или на иных искусственных основаниях, модуль упругости которых превышает значение 400 МПа, контроль модуля упругости первого отсыпаемого слоя допускается не выполнять, в случае, когда толщина этого слоя будет меньше диаметра плиты малогабаритной установки динамического нагружения, т.е. при $h_{\text{в}} < d_{\text{шт}} = 0{,}30$ м. Заметим, что данное условие может быть

справедливо и для условий, при которых заведомо известно, что подстилающий грунт имеет больший по значению модуль упругости, чем первый реконструируемый слой.

7. Располагать точки исследований необходимо не ближе 1 м к бровке насыпи.

Применительно к пункту 2 необходимо отметить следующее. Ранее в данной методике нами необоснованно было принято известное допущение из механики грунтов [**8**], связанное с контролируемой толщиной конструктивных слоев, при котором $h_{\text{н}} + h_{\text{в}} < 2d_{\text{шт}} = 0{,}60$ м ($h_н + h_в$ – суммарная толщина контролируемой группы слоев, м; $d_{шт}$ – диаметр нагрузочной плиты установки динамического нагружения, м). Не был учтен тот факт, что величина силы от падающего груза малогабаритной установки динамического нагружения, передаваемая на плиту нагружения, является весьма ограниченной по значениям в сравнении с нагрузками, прикладываемыми традиционным штампом. Нельзя однозначно утверждать, что этой величины будет достаточно для всех типов грунтов с модулями упругости, находящимися в диапазоне от 30 до 370 МПа при исследуемой толщине 0,60 м для получения объективной характеристики $E^{i}_{\text{стр}}$. Поэтому в ходе теоретических и экспериментальных исследований, авторы настоящей статьи пришли к выводу, что более правильным будет использовать предлагаемую методику для суммарной толщины исследуемых конструктивных слоев до 0,45 м в зависимости от типов исследуемых грунтов, т.е. $h_{\text{н}} + h_{\text{в}} \leq 0{,}45$ м.

Также заметим, что по результатам выполненных испытаний разница в фактически измеренных и теоретических значениях общих модулей упругости не должна превышать 10 %, при этом допускается превышение данной величины для условия $E^{i}_{\text{стр}} \geq E^{i}_{T}$.

В случае, когда при проведении трех промежуточных измерений в одной точке был выявлен большой разброс результатов измерений, то необходимо изменить положение исследуемой точки для повторного испытания. Если при выполнении повторного испытания снова возникает большой разброс результатов измерений, то требуется выполнение мероприятий, представленных ниже:

- в случае, когда по результатам выполненных измерений не достигнуто теоретических значений по модулю упругости, следует произвести дополнительное уплотнение грунта;
- если конструктивный слой представлен малосвязным грунтом, то перед уплотнением следует увеличить его влажность до оптимальной в соответствии с рекомендациями, представленными в [**9**];

– если слой грунта обработан неорганическими вяжущими, то требуется либо увеличение процентного содержания в смеси связующего той же марки, либо изменение марки связующего в большую сторону, с последующим уплотнением;
– частота расположения точек исследований вдоль линейного объекта должна регламентироваться в соответствии с техническим заданием, но не реже чем через 10 м; поперек линейного объекта – с шагом через 3-5 м.

Заключение

Следует отметить, что в настоящей статье детально не анализируются зависимости, принятые за основу при построении номограмм, так как они представлены в действующих официальных документах, регламентирующих проектирование автомобильных дорог в РФ. Предлагаемая методика адаптирована под зависимости, представленные в [**5**, **6**], а также под конструктивные особенности малогабаритной установки динамического нагружения типа ПДУ-МГ4 «Удар».

Данная методика позволит повысить соответствие выполняемых строительных работ проектному замыслу в части контроля качества уплотнения грунтов земляного полотна (подстилающего грунта) и конструктивных слоев дорожных одежд. Такую задачу можно оценивать как вполне осуществимую, поскольку контроль выполняется путем сопоставления одинаковых физических величин, заложенных в проектной документации и измеренных в процессе строительства, а именно величин общих модулей упругости.

В качестве основных направлений для дальнейших исследований можно выделить следующие:

1. Определение максимальной глубины воздействия малогабаритных установок динамического нагружения в зависимости от типов грунтов, их модулей упругости, температуры и влажности.
2. Исследование фактического распределения нормальных и касательных напряжений в различных типах грунтов, с разными модулями упругости, толщинами и структурой с учетом применения малогабаритных установок динамического нагружения, с целью разработки методики оценки прочностных характеристик грунтов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд; утв. распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства (Росавтодора) Министерства транспорта Российской Федерации от 20.12.00 № ОС-35-Р; введ. в действие с 01.01.2001. – М.: ФГУП «Информавтодор», 2001. – 148 с.*
2. *Федоренко Е.В. Предложения по оценке готовности грунтового основания и обеспечению требований нормативных документов / Е.В. Федоренко // Дорожная держава. – 2016. – № 68. – С. 69-71.*
3. *Кулижников А.М. О модуле упругости грунтов / А.М. Кулижников, А.В. Мошенжал, Н.В. Величутин // Автомобильные дороги. – 2016. – № 10. – С. 32-35.*
4. *Мошенжал А.В. Методика контроля качества устройства слоев основания дорожной одежды с покрытием из искусственных камней мощения [Электронный ресурс] / А.В. Мошенжал // Интернет-журнал «Территория геотехники». – 2016. – № 2. – URL: http://miakoming.ru/press/?EID=978 (дата обращения 18.10.2018).*
5. *МОДН 2-2001. Проектирование нежестких дорожных одежд. – Взамен ВСН 46-83; введ. в действие 15.04.2001. – М.: Государственный дорожный научно-исследовательский институт ФГУП «Союздорнии», 2002. – 160 с.*
6. *Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах: пособие. – М.: ФГУП «Информавтодор», 2004. – 191 с.*
7. *Блох Л.С. Практическая номография: учебное пособие / Л.С. Блох. – М.: «Высшая школа», 1971. – 328 с.*
8. *Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография / Г.Г. Болдырев. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.*
9. *Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог: учебно-практическое пособие / С.Г. Цупиков, А.Д. Гриценко, А.М. Борцов [и др.]. – М.: Инфра-Инженерия, 2005. – 992 с.*

L I T E R A T U R A

1. *ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd; utv. rasporjazheniem Gosudarstvennoj sluzhby dorozhnogo hozjajstva (Rosavtodora) Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii ot 20.12.00 No OS-35-R; vved. v dejstvie s 01.01.2001. – M.: FGUP «Informavtodor», 2001. – 148 s.*
2. *Fedorenko E.V. Predlozhenija po ocenke gotovnosti gruntovogo osnovanija i obespecheniju trebovanij normativnyh dokumentov / E.V. Fedorenko // Dorozhnaja derzhava. – 2016. – # 68. – S. 69-71.*
3. *Kulizhnikov A.M. O module uprugosti gruntov / A.M. Kulizhnikov, A.V. Moshenzhal, N.V. Velichutin // Avtomobil'nye dorogi. – 2016. – # 10. – S. 32-35.*
4. *Moshenzhal A.V. Metodika kontrolja kachestva ustrojstva sloev osnovanija dorozhnoj odezhdy s pokrytiem iz iskusstvennyh kamnej moshhenija [Jelektronnyj resurs] / A.V. Moshenzhal // Internet-zhurnal «Territorija geotehniki». – 2016. – # 2. – URL: http://miakoming.ru/press/?EID=978 (data obrashhenija 18.10.2018).*
5. *MODN 2-2001. Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd. – Vzamen VSN 46-83; vved. v dejstvie 15.04.2001. – M.: Gosudar-stvennyj dorozhnyj nauchno-issledovatel'skij institut FGUP «Sojuzdornii», 2002. – 160 s.*
6. *Posobie po proektirovaniju zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog na slabyh gruntah: posobie. – M.: FGUP «Informavtodor», 2004. – 191 s.*
7. *Bloh L.S. Prakticheskaja nomografija: uchebnoe posobie / L.S. Bloh. – M.: «Vysshaja shkola», 1971. – 328 s.*
8. *Boldyrev G.G. Metody opredelenija mehanicheskih svojstv gruntov. Sostojanie voprosa: monografija / G.G. Boldyrev. – Penza: PGUAS, 2008. – 696 s.*
9. *Spravochnik dorozhnogo mastera. Stroitel'stvo, jekspluatacija i remont avtomobil'nyh dorog: uchebno-prakticheskoe posobie / S.G. Cupikov, A.D. Gricenko, A.M. Borcov [i dr.]. – M.: Infra-Inzhenerija, 2005. – 992 s.*

IMPROVEMENT OF THE TECHNIQUE FOR QUALITY CONTROL OF SOILS COMPACTION

*Engineer **I.P. Rezyapkin**,*
*Engineer **D.E. Erchenko**,*
*Ph. D. (Tech.) **A.V. Moshenzhal***
(OOO «Miakom SPb»)
Contact information: from.work055@Gmail.com;
dina@s-impulse.org;
a.moshenzhal@gmail.com

This article deals with the study, which is a logical continuation of researches on quality control of performed construction works in regard to road pavements layers and underlying soils compaction. The modulus of elasticity of soils is taken as the controlled parameter.

An optimized approach to performing quality control of soils compaction during construction by comparing the design estimates of total elastic moduli values with those actually measured at the construction site is suggested. The nomographs for determination of theoretical (design) values of total modulus of elasticity are first proposed. These nomographs are adjusted to use in conjunction with small-sized equipment for dynamic loading, by which actual values of total moduli of elasticity are determined.

Two different cases: new construction and reconstruction reflected in the constructed nomographs are reviewed. The recommendations and clarifications concerning the technique application, as well as the limits to its applicability, and practicable methods for eliminating identified inconsistencies when constructing are also given. The key directions of further researches are determined.

Key words: *road pavements, modulus of elasticity, small-sized equipment for dynamic loading, soil compaction.*

Рецензент: д-р техн. наук О.А. Красиков (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 24.01.2018 г.