

## РАЗДЕЛ II

### СТРОИТЕЛЬСТВО.

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 625.7

#### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПРЕСС ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Н. П. Александрова, Т. В. Семенова, К. Ю. Стригун  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация.** В публикации выполнен обзор и анализ приборов и оборудования экспресс оценки модуля упругости, калифорнийского числа несущей способности и твердости грунтов, оцениваемой глубиной проникновения конуса динамических пенетрометров от одного удара. Анализ работ предшественников позволит разработать математические модели, связывающие коэффициент уплотнения грунта с коэффициентом увлажнения при испытании различными приборами, установками динамического нагружения, динамическими конусными пенетрометрами российского и зарубежного производства, измерителем жесткости грунта GeoGauge. В работе описывается методика экспериментальных исследований, включающую лабораторные работы и натурные испытания. Применение результатов исследования позволит сгущать сетку контроля коэффициента уплотнения, за счет чего повысится надежность испытаний и однородность степени уплотнения. Это приведет к повышению ровности покрытий и обеспечению требуемого уровня потребительских свойств автомобильной дороги на более продолжительном временном отрезке эксплуатации.

**Ключевые слова:** коэффициент уплотнения, коэффициент увлажнения, экспресс оценка степени уплотнения, динамический пенетрометр, установка динамического нагружения, измеритель жесткости грунта.

#### Введение

Качество уплотнения земляного полотна обуславливает показатели прочности и деформируемости грунтов, из которых построена его конструкция. В результате при правильно запроектированной дорожной одежде грунты работают в стадии уплотнения [1], претерпевая остаточные деформации, которые относительно числа, приложенных нагрузок носят затухающий характер [2,3] и связаны с напряжениями линейной зависимостью [4]. Таким образом, степень уплотнения грунта оказывает влияние на ровность покрытия, к которой норматив<sup>1</sup> выдвигает строгие требования, а в работах специалистов [5 – 8], ограничения по глубине неровностей еще более строгие. Ровность покрытий обуславливает важнейшие потребительские свойства автомобильных

дорог: скорость, безопасность и удобство движения, вследствие чего научные исследования, направленные на обеспечения качества уплотнения грунтов актуальны.

Критерием качества уплотнения является степень уплотнения грунта, она характеризуется величиной коэффициента уплотнения и должна соответствовать требованиям строительных правил<sup>2</sup>. Режим и объем контроля, а также предельные отклонения коэффициента уплотнения от требуемых значений регламентируются строительными правилами<sup>3</sup>. В нижних технологических слоях насыпей высотой более трех метров коэффициент уплотнения контролируют в поперечниках,

<sup>1</sup> ОДН 218.0.006.-2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог.

<sup>2</sup> СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85. – М.: Госстрой России, 2013.

<sup>3</sup> СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85. – М.: Минрегион России, 2013.

расположенных на расстоянии не более 50 м, а в других конструкциях поперечного профиля не реже, чем через 200 м. В верхнем технологическом слое земляного полотна не зависимо от конструкции его поперечного профиля степень уплотнения проверяют через каждые 50 м. При ширине земляного полотна до 20 м из поперечника отбирают три пробы, одну берут по оси сооружения, а две другие отбирают на расстоянии 1,5 – 2 м от бровки. При ширине – более 20 м в пределах поперечника берут еще две дополнительные пробы из промежутков между осью и бровкой. Безусловно, что для повышения надежности контроля коэффициента уплотнения целесообразно сгущение сетки контроля, то есть уменьшение шага отбора проб по длине и увеличение точек контроля в пределах одного поперечника. Точные методы определения плотности, регламентируемые государственными стандартами<sup>4</sup> обладают высокой трудоемкостью отбора проб и требуют значительных затрат времени на лабораторное определение плотности и влажности грунта. Поэтому возникает острая необходимость в развитии методов экспресс оценки степени уплотнения грунтов, выполняемой непосредственно на строительном объекте.

**Состояние вопроса**

В рамках состояния вопроса целесообразно выполнить анализ работ выполненных в двух направлениях:

1. Поиска корреляционных зависимостей связывающих параметры прочности и деформируемости грунта с его коэффициентом уплотнения.

2. Разработки и совершенствования приборов экспресс оценки показателей механических свойств грунта и степени его уплотнения. В исследованиях этого направления особый интерес представляют работы, в которых приведены математические модели, связывающие показания приборов с параметрами прочности и деформируемости грунта.

Большая экспериментальная работа по исследованию влияния влажности и степени уплотнения грунтов на показатели механических свойств выполнена В.М. Сиденко, О.Т. Батракова и Ю.А. Покутнева [9]. В результате получены эмпирические формулы, связывающие модуль упругости, сцепление и угол внутреннего трения с относительной влажностью и коэффициентом уплотнения грунта. Эти формулы приведены в таблице 1 [9]. Известно, что с увеличением плотности сухого грунта показатели прочности и деформируемости грунтов возрастают. В количественном отношении зависимость показателей механических свойств грунтов от коэффициента уплотнения и влажности можно представить эмпирическими формулами В.М. Сиденко, О.Т. Батракова и Ю.А. Покутнева [21], которые приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Формулы для расчета параметров прочности и деформируемости

Вид грунта	Показатель прочности или деформируемости	Формула
Суглинки и глины	Штамповый модуль упругости, МПа	$E = 35046 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(8,36 \cdot W^2 - 15,78 \cdot W)}$
	Сцепление, МПа	$c = 0,034 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(3,94 \cdot W - 6,81 \cdot W^2)}$
	Угол внутреннего трения, °	$\varphi = 58,6 \cdot (1 - W) \cdot k_y$
Супеси легкие непылеватые	Штамповый модуль упругости, МПа	$E = 209 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(1,627 \cdot W^2 - 3,56 \cdot W)}$
	Сцепление, МПа	$C = 0,202 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(4,6 \cdot W^2 - 7,58 \cdot W)}$
	Угол внутреннего трения, °	$\varphi = 43 \cdot (1 - 3 \cdot W) \cdot k_y$
Супеси крупные	Штамповый модуль упругости, МПа	$E = 82 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(0,4 \cdot W^2 - 0,72 \cdot W)}$

Примечание:  $W$  – относительная влажность, определяемая отношением влажности грунта  $W_e$  к влажности на границе текучести  $W_l$  ( $W = W_e / W_l$ ).

<sup>4</sup>ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М: ВГУП Стандартиформ, 2005. 19 с.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что возможно решение обратной задачи, то есть определения коэффициента уплотнения при известных относительной влажности грунта и параметрах прочности и деформируемости. Влажность на границе текучести определяется в лаборатории, а объем испытаний для одного вида грунта составляет 1 измерение на 2000 м<sup>3</sup>. То есть при строительстве земляного полотна этот параметр уже известен. Влажность грунта и показатели прочности и деформируемости можно определить на строительной площадке, применяя приборы для экспресс-оценки. Таким образом, у мастера возникает возможность оперативно определять достаточность степени уплотнения грунта и принимать решение об окончании работы катков. Сотрудники лаборатории имеют возможность сгущения сетки контроля (уменьшения шага измерений в продольном и поперечном направлении), что повышает надежность контроля. Сгущение сетки контроля дает преимущество выявление мест с неоднородным уплотнением то есть с резко отличающимися коэффициентами уплотнения. Наличие таких участков негативно сказывается на ровности покрытий. Связано это с тем, что грунт с более высоким коэффициентом уплотнения испытывает остаточные деформации меньшей величины, по сравнению с грунтом с меньшей степенью уплотнения. Как известно [10] глубина неровности в рассматриваемой точке покрытия обусловлена разностью остаточных деформаций в этой точке и точке с наименьшей деформацией. Поэтому устранение участков с неоднородным уплотнением в процессе строительства земляного полотна позволяет уменьшить интенсивность деградации ровности покрытия при эксплуатации дороги.

По показателям трудоемкости, производительности и точности, измеряемых параметров, наиболее эффективными средствами контроля являются приборы, устанавливаемые на поверхность земляного полотна и позволяющие за сравнительно короткое время измерять показатели, характеризующие степень уплотнения грунта. Из анализа таблицы 1 следует, что такими

показателями могут являться параметры прочности и деформируемости, например, модуль упругости или деформации грунта, применение которых для оценки качества уплотнения требует их корреляционной связи с коэффициентом уплотнения.

В настоящее время разработано большое количество приборов для определения кратковременного штампового модуля упругости (деформации) грунта. Такие приборы можно объединить в одну группу, называемую установками динамического нагружения (УДН). Методика измерений и обработки данных подробно прописана в руководствах пользователя, которые снабжены корреляционными таблицами, связывающими кратковременные модули со статическим модулем и коэффициентом уплотнения.

Отметим, что большинство таких приборов производятся за рубежом и сопровождаются импортным программным обеспечением, в котором коэффициент уплотнения вычисляется по отношению плотности сухого грунта к его максимальной плотности. Определяемой максимальной плотности за рубежом выполняют соответствующим типу грунта тестом (А, В или С) стандартным или модифицированным методом Р. Проктора. В РФ для этого эксперимента применяют метод стандартного уплотнения. Эти методы имеют отличия, как по методике проведения испытания, так и по оборудованию. Поэтому максимальная плотность грунта, определяемая по методам РФ, США и стран Евросоюза различная. Эта требует уточнения коэффициентов уплотнения, которые показывают зарубежные УДН или оборудование, работающее на импортном программном обеспечении.

Другим вариантом приборов, устанавливаемых на поверхность земляного полотна, являются измерители жесткости, по показаниям которых вычисляется модуль упругости. Одним из таких эффективных полевых приборов является измеритель жесткости грунта (GeoGauge), используемый для оценки параметров качества строительства и однородности свойств грунтов земляного полотна.

Таблица 2 – Формулы для расчета коэффициента уплотнения по показаниям прибора GeoGauge

Вид грунта	Формула
Суглинки и глины	$k_y = \sqrt[3]{\left[ \frac{1}{35046 \cdot \exp(8,36 \cdot W^2 - 15,78 \cdot W)} \cdot \frac{H_{SG} \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R} \right]^2}$
Супеси легкие непылеватые	$k_y = \sqrt[3]{\left[ \frac{1}{209 \cdot \exp(1,627 \cdot W^2 - 3,56 \cdot W)} \cdot \frac{H_{SG} \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R} \right]^2}$
Супеси крупные	$k_y = \sqrt[3]{\left[ \frac{1}{82 \cdot \exp(0,4 \cdot W^2 - 0,72 \cdot W)} \cdot \frac{H_{SG} \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R} \right]^2}$

Принципом работы GeoGauge является создание малых динамических нагрузок, действующих на частотах от 100 до 196 Гц [11]. Сила, порожденная GeoGauge, приблизительно составляет 9 Н и генерирует небольшое смещение почвы, составляющее около  $5 \cdot 10^{-4}$  дюйма или  $1,27 \cdot 10^{-6}$  м, которые имеют устойчивые значения на 25 частотах, находящихся в диапазоне между 100 и 196 Гц [11]. Связь статической жесткости  $K$  с модулем упругости однородного полупространства описывается формулой Егорова, которая с учетом конструкции жесткой кольцевой опоры дается в виде [12 – 14]:

$$K = \frac{1,77 \cdot E \cdot R}{(1 - \mu^2)}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости грунтового полупространства;  $R$  – внешний радиус жесткого опорного кольца прибора;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Из (1) модуль упругости определяется по формуле:

$$E = \frac{K \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R} = \frac{H_{SG} \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R}, \quad (2)$$

где  $H_{SG}$  – считываемые GeoGauge показания жесткости, МН/м;  $R$  – внешний радиус жесткого опорного кольца прибора, составляющий 57,15 мм (2,25 дюйма).

Авторам работы [13] формулы таблицы 1 и зависимость (2) связаны в результате чего получены выражения позволяющие вычислить коэффициент уплотнения грунтов по показаниям измерителя жесткости GeoGauge.

Третью группу приборов для контроля степени уплотнения грунта составляют пенетрометры статического и динамического действия. Плотномеры российского производства позволяют определять коэффициент уплотнения, но имеет один серьезный недостаток, связанный с тем, что их таблицы и графики в определенном диапазоне влажностей определяют значение коэффициента уплотнения как детерминированную величину. В действительности твердость грунта и степень уплотнения должны варьироваться в зависимости от влажности.

За рубежом большое внимание уделено поиску корреляционных зависимостей, связывающих показания динамического конусного пенетрометра с калифорнийским числом несущей способности грунта ( $CBR$ ). Так же известно большое количество работ, в которых найдены эмпирические формулы, связывающие модуль упругости грунта с  $CBR$ . Некоторые из этих зависимостей приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Корреляционные зависимости между  $CBR$  и  $DSPI$

Автор	Материал	Формула
M. Livneh [14]	Зернистые материалы и связные грунты	$\log(CBR) = 2,56 - 1,16 \cdot \log(DSPI)$
M. Livneh [15]		$\log(CBR) = 2,45 - 1,12 \cdot \log(DSPI)$
J.R. Harison [16]		$\log(CBR) = 2,55 - 1,14 \cdot \log(DSPI)$
S.L. Webster, R.H. Grau и T.P. Williams [17]	Различные виды дисперсных грунтов	$\log(CBR) = 2,46 - 1,12 \cdot \log(DSPI)$
J. Coonse [18]	Связные грунты	$\log(CBR) = 2,6 - 1,07 \cdot \log(DSPI)$

Примечание:  $DSPI$  – индекс проникновения конуса, мм/удар.

Таблица 4 – Эмпирические формулы для определения модуля упругости

Автор или документ	Формула для расчета модуля упругости при измерении в	
	psi (фунт/дюйм <sup>2</sup> )	кПа
W. Heukelom и A.J.G. Klomp [19]	$E = 1,5 \cdot CBR$	$E = 10,342 \cdot CBR$
Witczak [20], Sukumaran [21], Puppala [22]	$E = 1,42 \cdot CBR$	$E = 9,79 \cdot CBR$
Green and Hall [23]	$E = 5,409 \cdot CBR^{0,71}$	$E = 37,294 \cdot CBR^{0,71}$
Witczak [20], Sukumaran [21]	$E = 3 \cdot CBR^{0,65}$	$E = 20,684 \cdot CBR^{0,65}$
Powell et al. [24]	$E = 2,555 \cdot CBR^{0,64}$	$E = 17,616 \cdot CBR^{0,64}$

Авторы работы [25] использовали эмпирические формулы таблиц 3 и 4, что позволило получить формулу, связывающую коэффициент уплотнения с показаниями динамического конусного пенетрометра и относительной влажностью грунта.

По мнению авторов, представленные материалы, демонстрирую практическую значимость освещаемой в публикации задачи совершенствования методов экспресс оценки степени уплотнения грунта. Поэтому считая эту задачу актуальной, авторы предпримут попытку внести свой вклад в ее решение.

**Постановка цели и задач**

Анализ состояние вопроса позволяет поставить задачу, заключающуюся в обобщении результатов ранее выполненных исследований, которое позволяет получить ряд общих решений, связывающие коэффициент уплотнения с показаниями разных приборов и коэффициентом увлажнения грунтов.

**Описание исследования**

Анализируя формулы таблицы 1 нетрудно заметить, что коэффициент уплотнения может быть вычислен по обобщающей зависимости:

$$k_y = \left[ \frac{E}{A \cdot \exp(B \cdot W^2 - C \cdot W)} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

Таблица 5 – Ориентировочные значения параметров грунта<sup>5</sup>, применяемых в формулах (4)

Вид грунта	Разновидность грунта	Ориентировочные значения	
		Оптимальной влажности $W_0$ , %	Коэффициента $\alpha = W_0 / W_T$
Супесь	Легкие и тяжелые	9 – 15	0,70 – 0,75
	Пылеватые	12 – 18	
	Тяжелые пылеватые	15 – 22	
Суглинок	Легкие	14 – 22	0,55 – 0,60
	Легкие пылеватые	15 – 22	
	Тяжелые пылеватые		
Глина	Песчанистая	16 – 26	0,45 – 0,50
	Пылеватая		
	Жирная	20 – 30	

<sup>5</sup> Базавлук, В.А. Уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Теоретические основы и технологии / В.А. Базавлук, Е.Ю. Кузнецов – Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2006. – 100 с.

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – комплексные коэффициенты, зависящие от параметров грунта, характеризующих его вид и разновидность, и прибора, с помощью которого выполнено экспериментальное определение модуля упругости (деформации) грунта. Относительной влажностью удобно оперировать при проектировании дорожных одежд, а при контроле качества уплотнения грунтов наиболее рационально пользоваться оптимальной влажностью  $W_0$  или коэффициентом увлажнения  $k_{увл}$ . Эти параметры можно вычислить по формулам

$$k_{увл} = \frac{We}{W_0}; \quad W_0 = \alpha \cdot W_T, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент перехода от оптимальной влажности к влажности на границе текучести, определяемый отношением их значений, установленных экспериментально по методам изложенных ГОСТ.

Несмотря на то, что известны ориентировочные значения параметров грунта (таблица 5), используемых в формулах (4), при контроле качества они определяются экспериментально с периодичностью 1 раз на 2000 м<sup>3</sup> грунта.

Используя выражения (4) в зависимости (3) можно получить формулу:

$$k_y = \left[ \frac{E}{A \cdot \exp(B \cdot \alpha^2 \cdot k_{увл}^2 - C \cdot \alpha \cdot k_{увл})} \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (5)$$

Данные работ [19 – 24] показывают, что степенные зависимости являются наилучшим приближением, связывающим модуль упругости и показатель *CBR*. В общем виде эту связь можно записать выражениями:

$$E = a \cdot CBR^b; \quad CBR = b \left( \frac{E}{a} \right)^{\frac{1}{b}}, \quad (6)$$

где *a* и *b* – комплексные коэффициенты, учитывающие параметры грунта, характеризующие его вид и разновидность, а так же приборы, которыми определены модуль упругости (деформации) грунта и показатель *CBR*.

Подставив первую из зависимостей (6) в выражение (5) получим:

$$k_y = \left[ \frac{a \cdot CBR^b}{A \cdot \exp(B \cdot \alpha^2 \cdot k_{увл}^2 - C \cdot \alpha \cdot k_{увл})} \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (7)$$

Подстановка выражения (2) в формулу (5) приводит к зависимости:

$$k_y = \left[ \frac{H_{SG} \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R \cdot A \cdot \exp(B \cdot \alpha^2 \cdot k_{увл}^2 - C \cdot \alpha \cdot k_{увл})} \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Формулы (5), (7) и (8) устанавливают связь коэффициента уплотнения с показателями физических и механических свойств грунта и приборами, применяемыми для их определения, в том числе и экспресс оценки. В этих зависимостях можно учесть показания приборов, по которым определяются модуль упругости или

параметр *CBR*. Например, при определении модуля упругости грунта по обратимой осадке можно воспользоваться представлением Ж. Буссинеска, в соответствии с которым осадка штампа и модуль упругости связаны формулами:

$$S_y = \frac{w_{шт} p b (1 - \mu^2)}{E_y}; \quad S_y = \frac{w_{шт} p D (1 - \mu^2)}{E_y}; \quad (9)$$

$$E_y = \frac{w_{шт} p b (1 - \mu^2)}{S_y}; \quad E_y = \frac{w_{шт} p D (1 - \mu^2)}{S_y},$$

где *w<sub>шт</sub>* – коэффициент формы площади подошвы и жесткости фундамента, одинаковый для всей площади или различный для ее разных точек, принимаемый по данным Ф. Шлейхера, Н.А. Цытовича и М.И. Горбунова - Посадова, приведенным в таблице 6; *b* – ширина прямоугольного штампа, м; *D* – диаметр штампа, м.

В настоящее время имеется большой выбор динамических грунтовых пенетрометров российского и импортного производства. По мнению авторов динамический конусный пенетрометр<sup>6</sup> наиболее предпочтителен, потому что позволяет проводить испытания на глубину до 80 см и интерпретировать результаты в виде непрерывной по глубине функции изменения коэффициента уплотнения. То есть проводя измерение в одной точке технологического слоя насыпи можно выполнить измерения в двух, а то и в трех нижележащих технологических слоях. Суть этого метода состоит в измерении глубины проникновения конуса от одного удара груза. Для выявления эмпирической зависимости калифорнийского числа несущей способности грунта (*CBR*) от индекса динамического проникновения конуса (*DCPI*) выполнены обширные исследования [14 – 18].

<sup>6</sup>Оригинальный динамический конусный пенетрометр (*DCP*) был разработан в 1959 году профессором Джорджем Соуверсом (George Sowers). В

этом приборе стальная гиря массой 6,8 кг сбрасывается с высоты 50,8 см и ударяет по наковальне, для того чтобы вызвать проникновение конуса диаметром 3,8 см и углом при вершине 45° в грунт.

Таблица 6 – Значения коэффициента  $w_{шт}^7$

Форма штампа	$w_{шт}$ для полупространства				$w_{шт}$ для слоя ограниченной толщины при $h/b$ или $h/D$				
	$w_y$	$w$	$w_{ср}$	$w_{ж}$	0,25	0,5	1	2	5
Круглый	0,64	1,0	0,85	0,79	0,22	0,38	0,58	0,70	0,78
Квадратный	0,5w	1,12	0,95	0,88	0,22	0,39	0,62	0,77	0,87
Прямоугольный при $h/b=2$	0,5w	1,53	1,30	1,22	0,24	0,43	0,70	0,96	1,16
Прямоугольный при $h/b=3$	0,5w	1,78	1,53	1,44	0,24	0,44	0,73	1,04	1,31
Прямоугольный при $h/b=4$	0,5w	1,96	1,70	1,61	нет	нет	нет	нет	нет
Прямоугольный при $h/b=5$	0,5w	2,10	1,83	1,72	нет	нет	нет	нет	нет
Прямоугольный при $h/b=10$	0,5w	2,53	2,25	2,12	0,25	0,46	0,77	1,15	1,62

Примечание:  $w_y$ ,  $w$  и  $w_{ср}$  – коэффициенты для осадок угловых точек, максимальной под центром фундамента (штампа) и средней по всей загруженной площади;  $w_{ж}$  – коэффициенты для абсолютно жесткого фундамента (штампа); для слоя ограниченной толщины коэффициенты даны для средней осадки по всей загруженной площади при толщине слоя меньшей удвоенной эквивалентной толщины, определяемой по Н.А. Цытовичу.

Из анализа данных таблицы 3 следует, что коэффициенты эмпирических формул являются индивидуальными параметрами для каждого грунта, но они могут быть установлены испытаниями непосредственно на строительной площадке.

Формулы таблицы 3 представляют собой уравнения прямых в полулогарифмических координатах. В общем виде такое уравнение представим выражением:

$$\log(CBR) = f - g \cdot \log(DCPI). \quad (10)$$

где,  $DSPI$  – индекс проникновения конуса, мм/удар;  $f$  и  $g$  – параметры уравнения регрессии, зависящие от вида тестируемого материала.

Уравнение (10) подобно уравнениям, описывающим характер накопления остаточных деформаций в различных грунтах [26] и материалах [27,28]. Решение этого уравнение относительно параметра  $CBR$  несложно основано на применение основных свойств логарифмов и аналогично [26 – 28]. Применяв эти свойства и правило антилогарифмирования, получим формулу:

$$CBR = 10^f \cdot DCPI^{-g}. \quad (11)$$

Подставив (11) в (7) получим:

$$k_y = \left[ \frac{a \cdot 10^{f \cdot b} \cdot DCPI^{-g \cdot b}}{A \cdot \exp(B \cdot \alpha^2 \cdot k_{увл}^2 - C \cdot \alpha \cdot k_{увл})} \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (12)$$

Подставив выражение (11) в первую зависимость (6), получим:

$$E = a \cdot 10^{f \cdot b} \cdot DCPI^{-g \cdot b}. \quad (13)$$

Подстановка выражения (13) в формулу (5) приводит к зависимости (12). Отсюда

следует, что зависимость (12) является обобщающей математической моделью, позволяющей вычислять коэффициент уплотнения грунтов в зависимости от его вида и разновидности, глубины проникновения динамического конусного пенетрометра, а так же коэффициента увлажнения, определяемого отношением влажности грунта к его оптимальной влажности.

Формула (12) может быть применена для расчета коэффициента уплотнения при его экспресс определении динамическим плотномером КП-150. Суть российского метода состоит в том, что стержень КП-150 погружают в грунт на глубину 20 см, которая отмечена нижней рисккой. После погружения до нижней рисккой начинают фиксировать (отсчитывать) количество ударов, необходимых для погружения стержня еще на глубину 10 см, которая обозначена верхней рисккой. После окончания погружения прибора на полную глубину 30 см его извлекают с помощью ручек. На одной площадке производят не менее двух параллельных измерений. Расстояние между точками зондирования на одном месте должно быть не менее 20 см. Таким образом, если для каждой из двух точек измерений число ударов необходимое для погружения стержня на глубину 10 см обозначить  $n_{уд1}$  и  $n_{уд2}$ , то глубина погружения от одного удара (мм/удар) в каждой точке составит:

$$S_1 = \frac{100}{n_{уд1}}; \quad S_2 = \frac{100}{n_{уд2}}. \quad (14)$$

<sup>7</sup>Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

При использовании формулу (12) для ее модификации при применении динамического плотномера КП-150 укажем, что масса гири КП-150 составляет 2,5 ( $\pm 0,05$ ) кг, высота ее сбрасывания 30 ( $\pm 0,3$ ) см, а угол конуса при вершине 30°. Таким образом, характеристики КП-150 и *DCPI* различны, вследствие чего при  $S=DCPI$  коэффициенты уплотнения различны. Для этого необходимо, чтобы параметры в выражении (12) были неодинаковы, то есть имели индивидуальные значения для каждого прибора. Подчеркивая эту разницу для вычисления коэффициента уплотнения при испытании КП-150 выражение (12) запишем в виде:

$$k_y = \left[ \frac{a_{\text{КП-150}} \cdot 10^{f_{\text{КП-150}} \cdot b_{\text{КП-150}}} \cdot S_{\text{max}}^{-g_{\text{КП-150}} \cdot h_{\text{КП-150}}}}{A_{\text{КП-150}} \cdot \exp(B_{\text{КП-150}} \cdot \alpha^2 \cdot k_{\text{увл}}^2 - C_{\text{КП-150}} \cdot \alpha \cdot k_{\text{увл}})} \right]^2, \quad (15)$$

где  $S_{\text{max}}$  – максимальная глубина проникновения за один удар, полученная из испытаний в двух точках на одной площадке (точке) поперечного профиля.

Д-Х Чен [29] установил, что модули упругости, вычисляемые по данным динамических испытаний (FWD тесты), выше, чем измеряемые с помощью GeoGauge. В результате была предложена корреляционная зависимость [29]:

$$E_{\text{FWD}} = 37,65 \cdot H_{\text{SG}} - 261,96. \quad (16)$$

$$H_{\text{SG}} = \frac{E_{\text{FWD}} + 261,96}{37,65}. \quad (17)$$

Подстановка зависимости (17) в формулу (8) позволяет получить в общем виде математическую модель для вычисления коэффициента уплотнения через модуль упругости грунта, вычисленные по данным динамических испытаний.

#### Методика экспериментальных исследований для определения коэффициентов математических моделей

Коэффициенты математических моделей зависят от вида, уплотняемого грунта, и применяемых для контроля степени уплотнения приборов. Для определения этих коэффициентов выполнен цикл экспериментальных работ.

В основе эксперимента лежит стандартная методика пробного уплотнения грунтов укаткой. Суть этой методики сводится к тому, что на строящемся участке в пределах первой захватки выделяются участки, которые и разбиваются на поперечники. В пределах каждого участка укладывается технологический слой одного и того же грунта, но с различными коэффициентами

увлажнения. Причем коэффициенты увлажнения грунта не должны выходить за рамки требуемых значений. То есть состояние грунта по влажности должно обеспечивать требуемую степень уплотнения, например  $k_{y(\text{тр})}=0,98$ . Поэтому до организации работ для применяемого грунта лаборатория определяет зерновой состав, влажности на границе текучести и раскатывания, вычисляя число пластичности. Это дает возможность определить вид и разновидность грунта. Помимо этих испытаний лаборатория проводит тест на определение максимальной стандартной плотности и оптимальной влажности.

Далее укладывается технологический слой грунта, который уплотняется укаткой. При уплотнении грунта проходами катка периодически производятся тесты приборами экспресс оценки степени уплотнения и штамповые испытания для определения модуля упругости грунта, а так же выполняется отбор проб для определения плотности и влажности грунта в лаборатории с последующим вычислением плотности сухого грунта. По данным лаборатории вычисляются точные значения коэффициента уплотнения и коэффициента увлажнения. Кроме того, лаборатория определяет показатель *CBR*, тестируя грунт в соответствии с требованиями стандарта<sup>8</sup>.

Обработку результатов проводят в следующем порядке:

1. Устанавливают значения коэффициентов *A*, *B* и *C* в формуле (5).
2. Используя штамповые модули упругости и значения *CBR*, установленные в лаборатории, находят значения коэффициентов *a* и *b* в формулах (6).
3. Используя данные натурных испытаний по определению *DCPI* и ее аналогов  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_{\text{max}}$  в формуле (11).

В настоящее время авторами определены коэффициенты формулы (15), которая для большей практичности приведена к виду:

$$k_y = \left[ \frac{a_{\text{КП-150}} \cdot 10^{D_{\text{КП-150}}} \cdot S_{\text{max}}^{-E_{\text{КП-150}}}}{A_{\text{КП-150}} \cdot \exp(B_{\text{КП-150}} \cdot \alpha^2 \cdot k_{\text{увл}}^2 - C_{\text{КП-150}} \cdot \alpha \cdot k_{\text{увл}})} \right]^2, \quad (18)$$

где  $D_{\text{КП-150}}$  и  $E_{\text{КП-150}}$  – коэффициенты, вычисленные произведениями соответствующих коэффициентов формулы (15).

<sup>8</sup> ASTM D 1883. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.



### Заключение

1. Разработанный метод позволяет производить оценку коэффициента уплотнения по данным измерений:

1.1. Модуля упругости или калифорнийского числа несущей способности, применяя современные приборы (установки динамического нагружения).

1.2. Глубины проникновения наконечника от одного удара, применяя оригинальный динамический конусный пенетrometer или динамические плотномеры, например КП-150. Применение плотномера КП-150 позволяет определить среднюю величину коэффициента уплотнения в одном технологическом слое на глубине от 20 – до 30 см. Применение динамического конусного пенетromетра позволяет производить непрерывную оценку коэффициентов уплотнения по глубине земляного полотна. Это достигается тем, что от каждого удара измеряется *DSPI*, по величине которой судят о значении коэффициента уплотнения.

2. Рассмотренные испытания можно рассматривать как дополнительные к регламентируемым нормативными документами, что позволяет сгущать сетку контроля коэффициента уплотнения. Таким образом, появляется возможность улучшить качество контроля степени уплотнения земляного полотна и повысить однородность плотности, прочности и деформируемости грунта в сооружении. Повышение однородности плотности грунта позитивно отразится на ровности покрытия и потребительских свойствах дороги.

### Библиографический список

1. Александров, А.С. Расчет пластических деформаций материалов и грунтов дорожных при воздействии транспортной нагрузки / А.С. Александров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. Строительство – 2009. – № 2. – С. 3 – 11.
2. Hu M. et al. Stress-induced anisotropy in sand under cyclic loading // Granular Matter. – 2010. – Vol. 12. – Pp. 469–476.
3. Wichtmann T., Niemunis A. Triantafyllidis Th. Strain accumulation in sand due to drained cyclic loading: on the effect of monotonic and cyclic preloading (Miner's rule) // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010. Vol.30, No 8, Pp. 736 – 745.
4. Александров, А.С. Нелинейное пластическое деформирование материалов при воздействии повторных кратковременных нагрузок / А.С. Александров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – № 10. – С. 74 – 84.

5. Золотарь, И.А. К определению остаточных деформаций в дорожных конструкциях при многократных динамических воздействиях на них подвижных транспортных средств / И.А. Золотарь. – Санкт-Петербург: Изд-во ВАТТ, 1999. – 31 с.

6. Александров, А.С. Критерии расчета дорожных конструкций по ровности, допускаемые и предельные неровности / А.С. Александров // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – №4. – С. 97 – 104.

7. Фадеев, В.Б. Влияние остаточных деформаций грунта земляного полотна на колеобразование на проезжей части дорог с жесткими дорожными одеждами / В.Б. Фадеев // Автореф...канд. техн. наук. – М.: Изд-во МАДИ, 1999. – 21 с.

8. Александров, А.С. О допускаемых и предельных значениях неровностей асфальтобетонных покрытий дорожных одежд жесткого типа / А.С. Александров, С.А. Гордеева, Д.Н. Шпилько // Автомобильная промышленность. – 2011. – №2. – С. 31 – 35.

9. Сиденко, В.М. Дорожные одежды с парогидроизоляционными слоями / В.М. Сиденко, О.Т. Батраков, Ю.А. Покутнев. – М.: Транспорт, 1984. – 144 с.

10. Александров, А.С. Моделирование деформационных процессов, протекающих в связных грунтах / А.С. Александров // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2002. – №4. – С. 16 – 19.

11. Humboldt. Construction Materials Testing Equipment. GeoGauge. – Электронный ресурс: <http://www.humboldtmg.com/geogauge.html>. (дата обращения 12.02.2013).

12. Sawangsuriya A., Edil T.B., Bosscher P.J. Evaluating Stiffness and Strength of Pavement Materials // Geotechnical Engineering. 2005. – Vol. 158. – Pp. 217-230.

13. Александрова, Н.П., Применение измерителя жесткости грунта Geogauge для оценки качества уплотнения при операционном контроле / Н.П. Александрова, Н.А. Троценко // Вестник СибАДИ, 2014, № 3 – С. 40 – 47.

14. Livneh M. Validation of Correlations between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests, // Transp. Res. Rec. 1219. Transportation Research Board, Washington, D.C. – 1987. – pp. 56-67.

15. Livneh, M., Ishai, I., Livneh, N.A. Automated DCP Device Versus Manual DCP Device. // Rd. and Transport Res. – 1992. – Vol. 1, № 4.

16. Harison J.R. Correlation between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils, // Proc. Instn. Of Civ. Engrs., London, Part 2, 1987. Pp. 83-87.

17. Webster S.L., Grau, R.H., Williams, T.P. Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer // Final Report, Department of Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1992.

18. Coonse J. Estimating California Bearing Ratio of Cohesive Piedmont Residual Soil Using the Scala Dynamic Cone Penetrometer. Master.s Thesis (MSCE), North Carolina State University, Raleigh, N.C. 1999.

19. Heukelom W., Klomp A.J.G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. // Proc., of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. 1962.

20. Witczak M.W., Qi, X., Mirza M.W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // Journal of Transportation Engineering. – 1995. – Vol. 121, №. 3. – Pp. 273-282.

21. Sukumaran B., Kyatham V., Shah A., Sheth D. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Re-silient Modulus // Proceedings: Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, 2002. – 9 p.

22. Puppala A.J. Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design // NCHRP Synthesis 382, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. – 2008. – 139 p.

23. Green J.L., Hall, J.W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements Volume I: Experimental Test Re-sults and Development of Evaluation Methodology and Procedure // Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1 (September 1975). – 214 p.

24. Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C., Nunn M.E. The Structural Design of Bituminous Roads // Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 1132, Department of Transport, Berkshire, United Kingdom.

25. Семенова, Т.В. Применение Калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетрометра для оценки качества уплотнения грунта / Т.В. Семенова, Г.В. Долгих, Б.Н. Полугородник // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 1 – С. 59 – 66.

26. Александров, А.С. Применение теории наследственной ползучести к расчету деформаций при воздействии повторных нагрузок / А.С. Александров. – Омск: СибАДИ, 2014. – 152 с.

27. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. //Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements. London – 1972. P. 161-174.

28. Александров, А.С. Пластическое деформирование гранодиоритового щебня и песчано-гравийной смеси при воздействии трехосной циклической нагрузки / А.С. Александров // ИСЖ. – 2013. – №4. – С. 22 – 34.

29. Chen D-H, Bilyeu J., He, R. Comparison of Resilient Moduli Between Field and Laboratory Testing: A Case Study Paper number 990591. 78th Annual Transportation Research Board Meeting. Washington D.C., January 10-14, 1999.

**IMPROVING THE METHODS FOR EXPRESS EVALUATION OF THE QUALITY OF A ROAD BED'S SOIL COMPACTION DURING CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS**

N.P. Aleksandrova, T.V. Semenova, K.Y. Strigun

**Abstract.** The authors have implemented a review and analysis of instruments and equipment for express evaluation of elasticity modulus, California bearing ratio and soil hardness, measured by the

depth of penetration of the dynamic penetrometers' cone from a single impact. The analysis of the predecessors' work will allow to develop mathematical models relating the coefficient of soil compaction with a coefficient of moisture when testing with various devices, installations of dynamic loading, dynamic cone penetrometers of Russian and foreign production, soil hardness gauge - GeoGauge. The authors describe the methodology of experimental studies, including laboratory works and full-scale testing. The use of research results will allow condense the grid of compaction ratio's control, which will increase the reliability of tests and the homogeneity of compaction's degree. This will increase the smoothness of surfaces and ensure the required level of consumer properties of an automobile road for a longer period of operation.

**Keywords:** compaction ratio, coefficient of moisture, express evaluation of a compaction's degree, dynamic penetrometer, installation of dynamic loading, soil hardness gauge.

**References**

1. Aleksandrov A.S. Raschet plasticheskikh deformatsiy materialov i gruntov dorozhnykh pri vozdeystvii transportnoy nagruzki [Calculation of plastic deformations of materials and soil under impact of transport loading]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy. Stroitelstvo*, 2009, no 2. pp. 3 – 11.

2. Hu M. att all. Stress-induced anisotropy in sand under cyclic loading // *Granular Matter*. – 2010. – Vol. 12. – Pp. 469–476.

3. Wichtmann T., Niemunis A. Triantafyllidis Th. Strain accumulation in sand due to drained cyclic loading: on the effect of monotonic and cyclic preloading (Miner's rule) // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010. Vol.30, no 8, Pp.736 – 745.

4. Aleksandrov A.S. Nelineynoye plasticheskoye deformirovaniye materialov pri vozdeystvii povtornykh kratkovremennykh nagruzok [Nonlinear plastic deformation of materials under influence of repeated short-term loadings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*, 2008, no 10. pp. 74 – 84.

5. Zolotar I.A. K opredeleniyu ostatochnykh deformatsiy v dorozhnykh konstruksiyakh pri mnogokratnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh na nikh podvizhnykh transportnykh sredstv [To determination of residual deformations in road structures at repeated dynamic impacts on them of mobile vehicles]. St.-Petersburg: Izd-vo VATT, 1999. 31 p.

6. Aleksandrov A.S. Kriterii rascheta dorozhnykh konstruksiy po rovnosti, dopuskayemye i predelnyye ne-rovnosti [The criteria of calculating road structures on flatness assumed and limit roughnesses]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2008, no 4. pp. 97 – 104.

7. Fadeyev V.B. Vliyaniye ostatochnykh deformatsiy grunta zemlyanogo polotna na koleyobrazovaniye na proyezzhey chasti dorog s nezhestkimi dorozhnyimi odezhdami [Influence of residual deformations of a roadbed's soil on rutting on roadways with nonrigid pavements]. Avtoref. kand. tekhn. nauk, Moscow, Izd-vo MADI, 1999. 21 p.

8. Aleksandrov A.S.Б Gordeyeva S.A., Shpilko D.N. O dopuskayemykh i predelnykh znacheniyakh nerovnostey asfaltobetonnykh pokrytiy dorozhnykh odezhd zhestkogo tipa [On assumed and limit values of roughnesses of asphalt concrete pavements of rigid type]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2011, no 2. pp. 31 – 35.
9. Sidenko V.M., Batrakov O.T., Pokutnev Y.A. *Dorozhnyye odezhdyy s parogidrozolyatsionnymi sloyami* [Pavements with steam and water-proof layers]. Moscow, Transport, 1984. 144 p.
10. Aleksandrov A.S. Modelirovaniye deformatsionnykh protsessov, protekayushchikh v svyaznykh gruntakh [Modeling of the deformation processes proceeding in cohesive soil]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*, 2002, no 4. pp. 16 – 19.
11. Humboldt. Construction Materials Testing Equipment. GeoGauge. – Электронный ресурс: <http://www.humboldtmfg.com/geogauge.html>. (дата обращения 12.02.2013).
12. Sawangsurriya A., Edil T.B., Bosscher P.J. Evaluating Stiffness and Strength of Pavement Materials. // *Geotechnical Engineering*. 2005. – Vol. 158. – Pp. 217-230.
13. Aleksandrova, N.P., Trotsenko N.A. Primeneniye izmeritelya zhestkosti grunta Geogauge dlya otsenki kachestva uplotneniya pri operatsionnom kontrole [Use of the soil hardness gauge – Geogauge for assessing compaction quality at operational control]. *Vestnik SibADI*, 2014, no 3 pp. 40 – 47.
14. Livneh M. Validation of Correlations between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests, // *Transp. Res. Rec.* 1219. Transportation Research Board, Washington, D.C. – 1987. – Pp. 56-67.
15. Livneh, M., Ishai, I., Livneh, N.A. Automated DCP Device Versus Manual DCP Device. // *Rd. and Transport Res.* – 1992. – Vol. 1, № 4.
16. Harison J.R. Correlation between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils, // *Proc. Instn. Of Civ. Engrs.*, London, Part 2, 1987. Pp. 83-87.
17. Webster S.L., Grau, R.H., Williams, T.P. Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer // *Final Report*, Department of Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1992.
18. Coonse J. Estimating California Bearing Ratio of Cohesive Piedmont Residual Soil Using the Scala Dynamic Cone Penetrometer. Master.s Thesis (MSCE), North Carolina State University, Raleigh, N.C. 1999.
19. Heukelom W., Klomp A.J.G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. // *Proc.*, of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. 1962.
20. Witczak M.W., Qi, X., Mirza M.W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // *Journal of Transportation Engineering*. – 1995. – Vol. 121, №. 3. – Pp. 273-282.
21. Sukumaran B., Kyatham V., Shah A., Sheth D. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Re-silient Modulus // *Proceedings: Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*, 2002. – 9 p.
22. Puppala A.J. Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design // *NCHRP Synthesis 382*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. – 2008. – 139 p.
23. Green J.L., Hall, J.W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements Volume I: Experimental Test Re-sults and Development of Evaluation Methodology and Procedure // *Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1* (September 1975). – 214 p.
24. Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C., Nunn M.E. The Structural Design of Bituminous Roads // *Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 1132*, Department of Transport, Berkshire, United Kingdom.
25. Semenova T.V. Dolgikh G.V., B.N. Polugorodnik Primeneniye Kaliforniyskogo chisla nesushchey sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya otsenki kachestva uplotneniya grunta [Application of the California bearing ratio and dynamic cone penetrometer for assessing quality of soil compaction]. *Vestnik SibADI*, 2014, no1, pp. 59 – 66.
26. Aleksandrov A.S. *Primeneniye teorii nasledstvennoy polzuchesti k raschetu deformatsiy pri vozdeystvii povtornykh nagruzok* [Application of the ancestral creeping theory to calculation of deformations under influence of reloadings]. Omsk, SibADI, 2014. 152 p.
27. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. // *Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements*. London – 1972. P. 161-174.
28. Aleksandrov A.S. Plasticheskoye deformirovaniye granodioritovogo shchebnya i peschano-graviynoy smesi pri vozdeystvii trekhosnoy tsiklicheskoй nagruzki [Plastic deformation of grain and diorite crushed stone and sand-gravel mix under influence of three-axis cyclic loading]. *ISZh*, 2013, no 4. pp. 22 – 34.
29. Chen D-H, Bilyeu J., He, R. Comparison of Resilient Moduli Between Field and Laboratory Testing: A Case Study Paper number 990591. // *78th Annual Transportation Research Board Meeting*. Washington D.C., January 10-14, 1999.

*Александрова Наталья Павловна (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: aleksandrov00@mail.ru).*

*Семенова Татьяна Викторовна (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: semenova\_tv@sibadi.org).*

*Стригун Ксения Юрьевна (Россия, г. Омск) – магистрант ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).*

*Alexandrova Natalia Pavlovna (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical sciences, associate professor "Construction and maintenance of roads", The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: aleksandrov00@mail.ru).*

*Semenova Tatyana Viktorovna (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical sciences,*

*associate professor "Construction and maintenance of roads", The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: semenova\_tv@sibadi.org)*

*Strigun Ksenia Yurevna (Russian Federation, Omsk) – master's student of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5).*

УДК 625.7

### ОБОСНОВАНИЕ ГРУППОВЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА УЧАСТКАХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Т.В. Боброва, А.А. Дубенков  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация.** Предложен метод решения задачи о закреплении групповых конструктивных решений земляного полотна за участками с повторяющимися по трассе инженерно-геологическими условиями при проектировании автомобильных дорог на многолетнемерзлых основаниях. Разработан алгоритм выбора эффективных вариантов на основе комбинаторного метода по критерию минимизации суммарных дисконтированных затрат на строительство, капитальный ремонт, ремонт и содержание дорожной конструкции в течение жизненного цикла. Результатом решения задачи является структурирование объекта как основы для организационно-технологического проектирования.

**Ключевые слова:** земляное полотно, групповые конструктивные решения, линейные дорожные комплексы, многолетнемерзлые основания, затраты в жизненном цикле.

#### Введение

В соответствии с актуализированной редакцией СП 32-104-98 [1] при проектировании земляного полотна железных дорог применяют три различных подхода: типовые конструктивные решения для участков с простыми инженерно-геологическими и топографическими условиями в соответствии с альбомом типовых решений; индивидуальные проекты, разрабатываемые для отдельных участков со сложными инженерно-геологическими условиями, когда требуется проверка устойчивости и прочности земляного полотна и его основания; групповые поперечные профили, разрабатываемые для применения на ряде участков со сложными и многократно повторяющимися на рассматриваемой линии инженерно-геологическими условиями. При этом земляное полотно с уточненными на основании выполненных расчетов параметрами (по сравнению с типовыми поперечными профилями) не требует индивидуального обоснования для каждого объекта.

Аналогичные подходы целесообразно применить при проектировании земляного полотна автомобильных дорог. Решающую роль при назначении конструктивных параметров земляного полотна автомобильной дороги играет полнота и достоверность информации, полученной в процессе инженерных изысканий автомобильной дороги. На основе исследований, представленных в работах [2,3] разработана методика, позволяющая с достаточной степенью достоверности выделить однородные участки с характерными природными условиями, что чрезвычайно важно при проектировании дорожных конструкций, организации строительства, а в дальнейшем при мониторинге состояния и эксплуатации дорог в условиях криолитозоны.

Реализация данной методики позволяет последовательно по этапам осуществлять декомпозицию объекта (трассы дороги) на природно-климатические зоны, участки линейных дорожных комплексов (ЛДК) в составе зон, участки с особо сложными