

следующих величин: максимальная плотность γ_{max} ; оптимальная W_{opt} и фактическая W_ϕ влажности. Для наглядности произведено совмещение плотностей распределения величин γ_{max} , W_{opt} и W_ϕ для всей области и по отдельным дорожно-климатическим районам. При обработке данных рассматривались наиболее распространенные законы статистического распределения. Результаты обработки приведены на рис. 1–3.

Из материалов, представленных выше, следует, что плотность распределения оптимальной и фактической влажности, максимальной плотности грунтов земляного полотна автомобильных дорог подчиняется нормальному закону. Для различных дорожно-климатических районов математическое ожидание величин довольно существен-

но отличается и районирование, предлагаемое СНиП 2.05.02-85*, недостаточно верно отражает реальные условия.

Анализ материалов, представленных на рис. 1–3 и в таблице, позволяет сделать следующие выводы.

1. Преобладающим грунтом для Кемеровской области является суглинок.

2. При нормировании плотности грунтов земляного полотна автомобильных дорог целесообразно использовать более детальное дорожно-климатическое районирование.

3. Для проектирования земляного полотна и автомобильных дорог целесообразно использовать усредненные показатели по отдельным дорожно-климатическим районам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд / Минтранс России. – М.: Информавтодор, 2001. – 145 с.
2. Ефименко В. Н. Дорожно-климатическое районирование Кемеровской области // Опыт обеспечения эффективности дорожного комплекса Кузбасса: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1997. – С. 62–66.

УДК 625.7:624.13.001.5

А. О. Афиногенов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА КАРЬЕРНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В ряде работ приводятся данные (к сожалению, без должного обоснования), что при коэффициенте уплотнения 1,03–1,05 прочностные характеристики грунта земляного полотна автомобильных дорог и модуль его упругости повышаются на 30–50 %, это приводит к снижению толщины дорожной одежды на 10–30 % и уменьшению сметной стоимости строительства на 3,0–6,5 тыс. руб. (в ценах 1991 г.) [1, 2].

В современных условиях, когда проблема существенного снижения себестоимости перевозок горной массы на карьерах выходит на первый план, повышение требований к прочности земляного полотна, особенно его рабочего слоя, является важным резервом обеспечения экономичности дорожных конструкций и увеличения срока их службы. Поскольку толщина дорожной одежды, ширина проезжей части на карьерных дорогах значительно больше, чем на дорогах общего пользования, эффект в абсолютных значениях затрат на 1 км будет значительно выше.

Общая толщина слоя переуплотненного грунта может быть образована одним или несколькими последовательно уплотняемыми слоями. Экономически наиболее целесообразно достигать повышенных значений плотностей в верхней части

рабочего слоя земляного полотна (толщиной 0,6–1,5 м).

Технологией повышенного уплотнения грунтов предусматривается использование грунтоуплотняющих машин, создающих нагрузку на грунт, близкую к пределу его прочности. К ним относятся вибрационные катки массой не менее 8 т, кулачковые катки массой не менее 18 т, катки на пневмоходу с максимальной массой более 25 т, трамбующие машины. При отсутствии специальных средств уплотнения укатку до значений $K_{upl} = 0,98–1,00$ можно производить загруженными карьерными самосвалами.

Экономический эффект от повышенного уплотнения грунтов верхней части рабочего слоя земляного полотна обусловлен снижением суммарных затрат на строительство земляного полотна и дорожной одежды в сравнении с традиционными конструкциями (при условии сохранения повышенной плотности во времени).

Устройство в дорожной конструкции слоя земляного полотна повышенной плотности позволяет уменьшить толщину одного или нескольких конструктивных слоев дорожной одежды. В связи с этим, для оценки эффективности мероприятий по повышенному уплотнению грунта, необходим

перерасчет дорожной одежды для измененных в результате уплотнения характеристик грунта. Порядок расчета дорожной одежды может быть принят по ОДН 218.048-01 [3].

На карьерных дорогах дорожные одежды, как правило, двухслойные. Для технико-экономических расчетов, точность которых для инженерных целей может быть принята в пределах $\pm 10\text{--}15\%$, достаточно ограничиться двухслойной моделью дорожной конструкции (покрытие + земляное полотно).

Для получения достаточно общих результатов с минимальными затратами рационально применить математическое моделирование с использованием теории планирования экспериментов. Для этой цели принята следующая модель:

$$C_{do} = f(K_{upl}, H_{do}), \quad (1)$$

где C_{do} – капитальные затраты на строительство 1 км дорожной одежды и земляного полотна; K_{upl} – коэффициент уплотнения грунта земляного полотна; H_{do} – эквивалентная толщина дорожной одежды, необходимая по условиям прочности.

При проведении планирования эксперимента необходимо, чтобы варьируемые факторы были независимы друг от друга, поэтому H_{do} – это толщина дорожной одежды, полученная расчетом на прочность в зависимости от величины и повторности нагрузки, свойств использованных материалов, при определенной степени уплотнения грунта. Предварительный расчет H_{do} не производится (в этом нет необходимости), эквивалентная толщина дорожной одежды задается, все остальные

варианты, получаются созданием равнопрочной конструкции (с учетом изменения плотности грунта). Это условие выполняется следующим образом: эквивалентный (общий модуль) упругости дорожной конструкции должен быть постоянным. При этом применяется нормированная методика расчета дорожной одежды на прочность по ОДН 218.046-01. Учитывая сложность задачи и реальную точность технико-экономических обоснований, для расчетов приняты усредненные значения характеристик. Расчетная схема приведена на рис. 1.

Математическое моделирование производили в соответствии с матрицей планирования двухфакторного эксперимента. Зависимость модуля упругости и других характеристик грунта от коэффициента уплотнения принимается по формуле, предложенной проф. О. Т. Батраковым [4], она имеет следующий вид (грунт – глина или суглинок):

$$E_y = 35046 K_{upl}^{-1.5} \cdot \exp[-15.78 W_p + 8.36 W_p^2] m \quad (2)$$

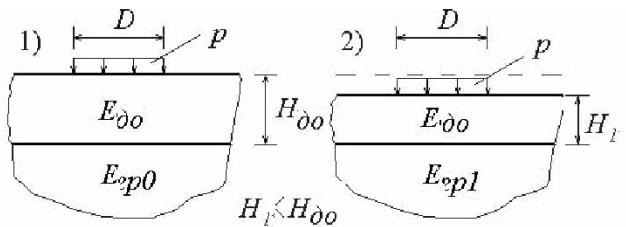


Рис. 1. Расчетная схема дорожной конструкции:
1 – при $K_{upl} = 0,90$; 2 – при $K_{upl} > 0,90$

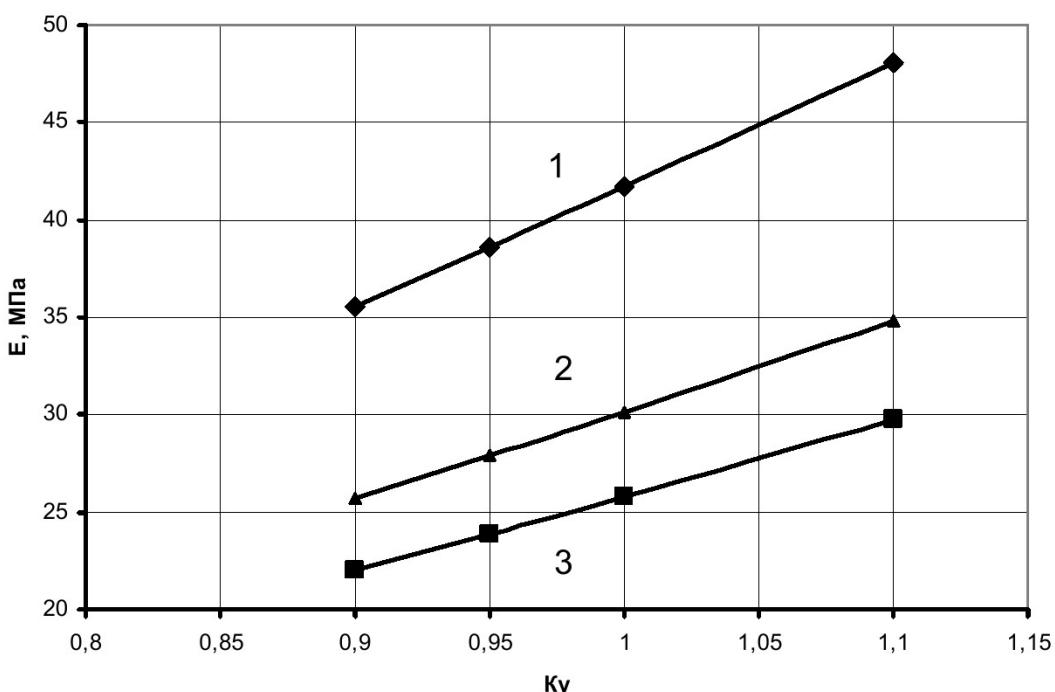


Рис. 2. Зависимость величины модуля упругости грунта от коэффициента уплотнения:
1 – при влажности грунта $W = 0,7$; 2 – $W = 0,8$; 3 – $W = 0,9$

где W_p – расчетная влажность грунта в активной зоне; m – коэффициент, учитывающий климатические особенности района строительства, для Кемеровской области $m = 1,24$.

Расчеты выполняются для значений характеристик, предлагаемых проф. В. Н. Ефименко для условий Кемеровской области [5]. Значения коэффициента m получены в результате сопоставления результатов расчетов по формуле проф. О. Т. Батракова с данными проф. В. Н. Ефименко. Для глинистого грунта в условиях дорожно-климатического района III.X.4 и 2-го типа местности по условиям увлажнения $W_p = 0,7$ (при коэффициенте уплотнения 0,95). По формуле (2) получим:

K_{upl}	0,90	1,00	1,10
E_y , МПа	35,6	41,7	48,1

Из формулы (2) видно, что влажность грунта существенно влияет на величину его модуля упругости.

Величина экономического эффекта определяется по формуле

$$\mathcal{E} = (Z_1 - Z_2)A \quad , \quad (3)$$

где Z_1 – затраты на строительство I км земляного

полотна и дорожной одежды по базовому (традиционному) варианту; Z_2 – то же, по предлагаемому варианту с использованием повышенного уплотнения грунтов; A – общий объем внедрения технологии повышенного уплотнения грунтов, км.

Поскольку в формуле (3) определяется разность между затратами по вариантам конструкций, тот же результат можно получить, если определять не все затраты, а только те, которые отличаются по этим вариантам. Например, можно учитывать не всё земляное полотно, а только ту его часть, где производится повышенное уплотнение.

Для оценки влияния степени уплотнения грунтов земляного полотна на толщину слоев основания, устраиваемых из различных материалов, должны быть проведены сопоставительные расчеты дорожных одежд. Для анализа целесообразно принять наиболее типичные конструкции дорожных одежд карьерных автодорог.

Затраты на устройство покрытия дорожной одежды и земляного полотна получены на основе осредненных для Кемеровской области данных по ГЭСН-2001-01 и ГЭСН-2001-27. В результате

Таблица 1

Значения коэффициента уплотнения, K_{upl}	Требуемая по условиям прочности толщина дорожной одежды при начальной (проектной) толщине дорожной одежды, м		
	0,4	0,6	0,8
0,9	0,40	0,60	0,80
1,0	0,28	0,44	0,72
1,1	0,18	0,36	0,67

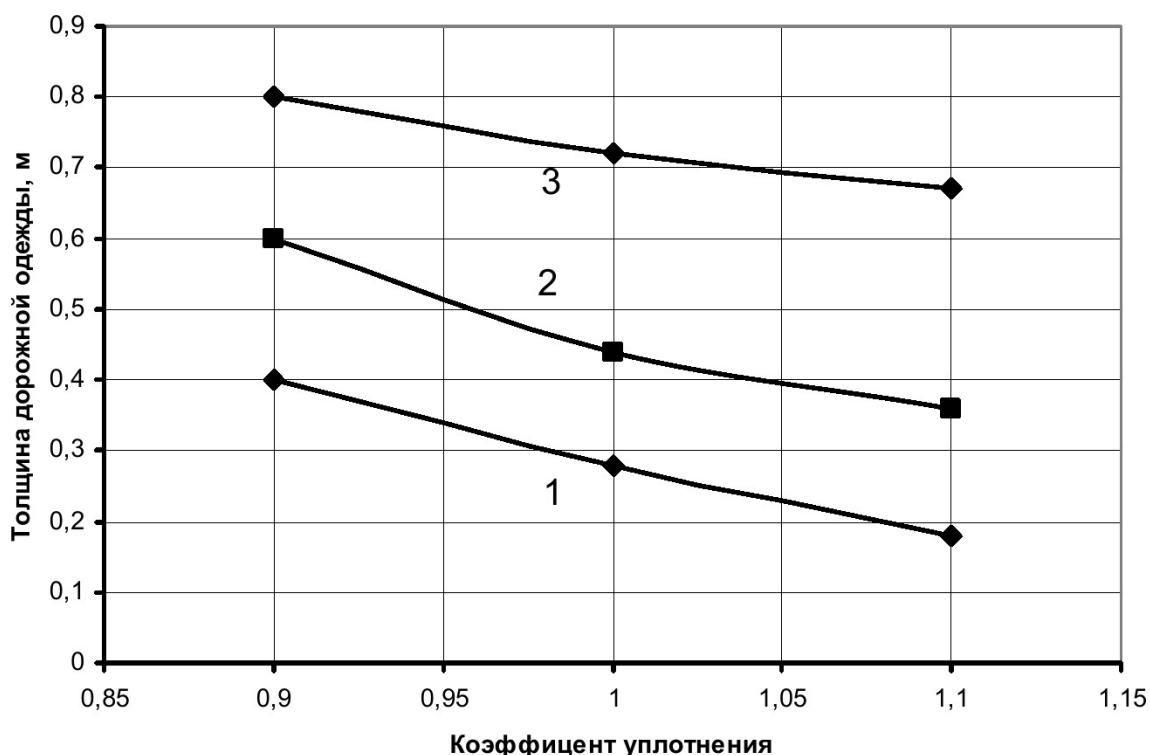


Рис. 3. Зависимость требуемой толщины дорожной одежды от коэффициента уплотнения грунта: 1 – при проектной толщине дорожной одежды $H_{DO} = 0,4\text{ м}$; 2 – $H_{DO} = 0,6\text{ м}$; 3 – $H_{DO} = 0,8\text{ м}$

расчетов могут быть построены зависимости затрат на устройство оснований и затрат на уплотнение верхнего слоя земляного полотна от коэффициента уплотнения $K_{упл}$. Расчет материальных затрат на уплотнение грунтов и устройство покрытия выполнен в соответствии с расценками ТЕР-2001-01 и ТЕР-2001-27.

Анализ результатов позволяет определить экономический эффект, обусловленный снижением толщины рассмотренных слоев оснований, в пересчете на 1 км дороги.

Для расчетов принят автомобиль БелАЗ-7549 (грузоподъемность 80 т) с диаметром отпечатка колеса $D = 1,21$ м. Принято, что дорожная одежда однослоистая и выполнена из плотной щебеночно-песчаной смеси C_1 фр. 0-40 мм по ГОСТ 25607-94*. Данные значения можно считать усредненными или наиболее типичными, с учетом рассматриваемой задачи (технико-экономический анализ) это не приводит с существенным ошибкам.

Задача состоит в оценке экономического эффекта при изменении проектной степени уплотнения грунта земляного полотна. Поскольку при увеличении плотности грунта повышаются его прочностные и деформативные характеристики, сравнивать необходимо равнопрочные конструкции. Для выполнения этого условия производится определение эквивалентного модуля упругости ($E_{общ}$) исходного варианта дорожной конструкции (дорожная одежда + земляное полотно), толщина дорожной одежды по другим вариантам определяется по значению $E_{общ}$. Рассматривается грунт земляного полотна в пределах активной зоны.

Расчеты выполняются по стандартной методике ОДН 218.046-01, с учетом параметров рас-

четного автомобиля, дорожной одежды и грунтов земляного полотна. Расчетная схема приведена на рис. 1. В качестве базового принят вариант дорожной одежды с уплотнением грунта до $K_{упл} = 0,90$. Если принять за основу другую степень уплотнения, это не повлияет на результаты анализа. Результаты расчетов приведены в табл. 1. При этом принято, что модуль упругости материала дорожной одежды $E_{до} = 300$ МПа (по ОДН 218.046-01, смесь C_1).

Расчетный автомобиль БелАЗ-7549 имеет габарит по ширине 5,36 м, согласно СНиП 2.05.07-91* (табл. 48) для дороги категории II-к ширина земляного полотна – 21 м. Для технико-экономических расчетов слой повышенного уплотнения принят на глубину 1,5 м, при заложении откосов 1:1,5 объем уплотняемого грунта на 1 км составит 34875 м³.

Технология уплотнения принята в соответствии с требованиями СНиП 3.06.03-85. При этом учтено, что уплотнение производится в два этапа: сначала кулачковыми, решетчатыми катками или катками на пневматических шинах с неполной балластной нагрузкой, затем окончательное уплотнение катками на пневматических шинах массой 25 т. Поскольку при любом требуемом коэффициенте уплотнения затраты на первый этап одинаковы, при сравнении учитывается только второй этап уплотнения.

Для достижения необходимой степени уплотнения грунта (см. табл. 4.2) количество проходов катка массой 25 т должно быть различным. На практике необходимое количество проходов катка устанавливается экспериментально (пробная укатка). В рамках данной работы это осуществить невозможно, поэтому мы воспользовались данными

Таблица 2

Факторы	Уровни варьирования факторов			Интервал варьирования
	нижний	средний	верхний	
Коэффициент уплотнения, $K_{упл}$	0,90	1,00	1,10	0,10
Эквивалентная проектная (начальная) толщина дорожной одежды, $H_{до}$, м	0,4	0,6	0,8	0,2

Таблица 3

№ опыта	$K_{упл}$ (X_1)	$H_{до}$, м (X_2)	Опытное значение C_3 , млн. руб.	Теоретическое значение C_T , млн. руб.	Ошибка эксперимента, %
1	0,90 (-)	0,4 (-)	1,591	1,633	+ 4,2
2	1,10 (+)	0,4 (-)	1,102	1,075	+ 2,5
3	0,90 (-)	0,8 (+)	2,864	2,901	+ 1,3
4	1,10 (+)	0,8 (+)	2,662	2,631	- 1,2
5	1,00 (0)	0,6 (0)	1,798	1,845	+ 4,7
6	1,10 (+)	0,6 (0)	1,675	1,733	+ 5,8
7	0,90 (-)	0,6 (0)	2,227	2,147	- 3,6
8	1,00 (0)	0,8 (+)	2,689	2,671	- 0,7
9	1,00 (0)	0,4 (-)	1,288	1,259	- 2,2

канд. техн. наук Л. И. Самойловой [2]. С учетом предварительного уплотнения для достижения заданных в эксперименте коэффициентов уплотнения: 0,9 – 1,0 – 1,1 необходимо произвести соответственно 4, 7 и 12 проходов катка массой 25 т. Указанные выше параметры учтены при выполнении сметного расчета.

интенсивности и др. факторами. Варьируя степень уплотнения грунта рабочего слоя, можно оценить влияние этого фактора на изменение требуемой толщины дорожной одежды, стоимость конструкции. За функцию отклика (зависимой переменной) приняты капитальные затраты на сооружение земляного полотна и дорожной одежды C .

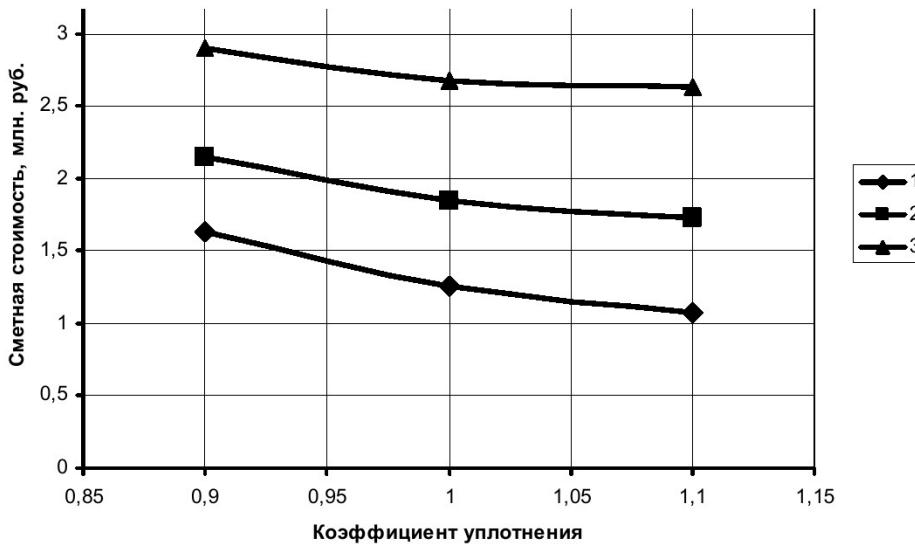


Рис. 4. Зависимость стоимости конструкции от величины коэффициента уплотнения:
1 – проектная толщина дорожной одежды $H_{DO} = 0,4 \text{ м}$; 2 – $H_{DO} = 0,6 \text{ м}$; 3 – $H_{DO} = 0,8 \text{ м}$

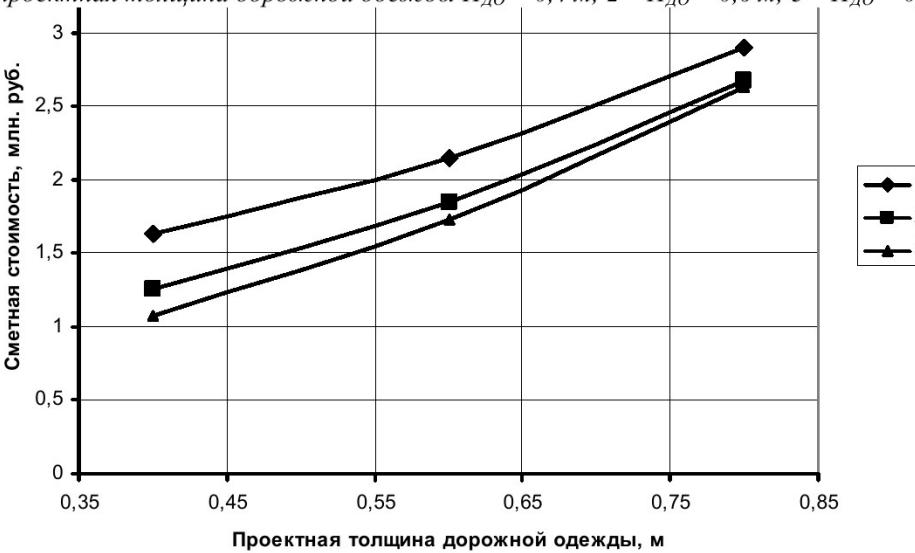


Рис. 5. Зависимость стоимости конструкции от проектной толщины дорожной одежды:
1 – коэффициент уплотнения грунта $K_y = 0,90$; 2 – $K_y = 1,0$; 3 – $K_y = 1,1$

Как оговорено выше, было принято решение использовать ортогональное планирование второго порядка для функции двух переменных: коэффициент уплотнения грунта и проектная толщина покрытия (эквивалентное по прочности однослойное покрытие). Из теории проектирования дорожных одежд известно, что зависимость имеет нелинейный характер. Отметим, что проектная толщина дорожной одежды H_{DO} по отношению к коэффициенту уплотнения является независимым параметром, определяется величиной нагрузки, её

Уровни варьирования факторов приведены в табл. 2, матрица планирования математического эксперимента – в табл. 3.

Результаты расчетов показаны в табл. 3, в ней C_3 – сметная стоимость по конкретному варианту $K_{y\text{up}}-H_{DO}$, C_T – теоретическое значение сметной стоимости, полученное по формуле (4). Подчеркнем, что при определении сметной стоимости в расчетах использовалась толщина покрытия по табл. 1.

Зависимость сметной стоимости дорожной

конструкции (по различающимся затратам) в кодированном виде:

$$C_T = 1,845 - 0,207 X_1 + 0,706 X_2 + \\ + 0,095 X_1^2 + 0,12 X_2^2 + 0,072 X_1 X_2, \quad (4)$$

где X_1 – коэффициент уплотнения грунта рабочего слоя; X_2 – проектная толщина дорожной одежды при коэффициенте уплотнения грунта рабочего слоя 0,9.

С использованием (4) и данных табл. 2 получим зависимость в раскодированном виде:

$$C_T = 12,375 - 21,07 K_{upl} + 9,5 K_{upl}^2 - 0,07 H_{do} + 3 H_{do}^2 \quad (5)$$

Формула (5) может быть использована для приближенной оценки стоимости работ в пределах интервалов варьирования факторов (см. табл. 2). Поскольку отношение $B_{12}/B_0 = 0,039$, т.е. менее 5 %, последний член формулы можно исключить (из-за незначительного влияния на результат).

Зависимости (4) и (5) не имеют какого-либо физического смысла, но удобны для анализа совместного влияния отдельных факторов на функцию отклика.

Поскольку эксперимент математический, произвести параллельные опыты невозможно, в этом случае оценку адекватности модели проводят вычислением ошибки расчетов (разность между C_3 и C_T в процентах). Из табл. 3 видно, что максимальная ошибка 5,8 %. Для технико-экономических расчетов это вполне удовлетворительный результат, т.е. полученная модель удовлетворительно описывает исследуемую зависимость. Из формулы (4) следует, что с увеличением значения коэффициента уплотнения стоимость конструкции уменьшается.

На рис.4, 5 показаны зависимости сметной стоимости дорожной конструкции (дорожная одежда + рабочий слой земляного полотна) от коэффициента уплотнения грунта земляного полотна и требуемой (проектной) толщины дорожной одежды. Можно заметить, что требуемая толщина дорожной одежды в значительной степени определяет капитальные затраты на строительство, но и влияние коэффициента уплотнения весьма существенно.

Из представленных материалов следует, что повышенное уплотнение глинистых грунтов земляного полотна карьерных дорог экономически целесообразно.

Экономический эффект повышенного уплотнения на 1 км карьерной дороги категории II-к с шириной земляного полотна – 21 м составит (3):

Коэффициент уплотнения	0,90	0,95	1,00	1,05
Экономический эффект, тыс. руб.	– 175,0	0	127,5	207,0

Для расчетов в качестве базового варианта принят случай уплотнения грунта рабочего слоя до величины $K_{upl} = 0,95$ (значение, предусмотренное действующими нормами [6, 7]).

Из представленных материалов можно сделать вполне однозначный вывод о весьма существенном экономическом эффекте и целесообразности повышенного уплотнения грунта рабочего слоя земляного полотна карьерных автомобильных дорог. Причем, эффект тем больше, чем выше категория дороги и грузоподъемность (габарит) расчетного автомобиля. Проектная толщина дорожной одежды практически не влияет на величину эффекта от повышенного уплотнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жустарев Е. В. Некоторые результаты экспериментальных исследований влияния плотности грунта земляного полотна автомобильных дорог в процессе накопления остаточных деформаций // Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог: Сб. науч. тр./ МАДИ-ТУ. – М., 1998. – С. 48–49.
2. Самойлова Л. И. Новые нормы плотности грунтов с учетом их однородности// Совершенствование автомобильных дорог и искусственных сооружений на Северо-Западе РСФСР: сб. науч. тр./ЛИСИ. – Л., 1987. – С. 102–106 .
3. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд/ Минтранс России. – М.: Информавтодор, 2001. – 145 с.
4. Батраков О. Т. Особенности конструирования и расчета одежд сельскохозяйственных дорог // Проектирование и строительство сельскохозяйственных дорог: сб. науч. тр./ МАДИ. – М., 1983. – С. 54–56.
5. Ефименко В. Н. Дорожно-климатическое районирование Кемеровской области // Опыт обеспечения эффективности дорожного комплекса Кузбасса: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1997. – С. 62–66.
6. СНиП 2.05.07-91*. Промышленный транспорт/Минстрой России. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 112 с.
7. СНиП 2.05.02-85*. Автомобильные дороги/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2006. – 55 с.

□Автор статей:

Афиногенов
Алексей Олегович
- соискатель каф. автомобильных дорог