

УДК 625.731.8

*ВОРОБЬЁВ ВАЛЕРИЙ СТЕПАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
decansgd@stu.ru*

*ПАК ЕЛЕНА ЛЕОНИДОВНА, аспирант,  
karelinaelena23@mail.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191*

## **ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

Проведены исследования дорожной одежды, земляного полотна на участках автомобильной дороги «К-17р» в местах устройства водопропускных труб. Показано влияние свойств грунта земляного полотна в местах устройства водопропускных труб на процесс образования деформаций дорожной одежды нежесткого типа. Определены физико-механические характеристики и параметры деформируемости грунта. Установлено, что в 93 % рассмотренных случаев на дорожной одежде в местах устройства водопропускных труб присутствуют деформации, первопричиной которых является наличие в за-трубном пространстве разуплотненных зон.

**Ключевые слова:** дорожная одежда; ровность покрытия; земляное полотно; водопропускная труба.

*VALERY S. VOROBYEV, DSc, Professor,  
decansgd@stu.ru*

*ELENA L. PAK, Research Assistant,  
karelinaelena23@mail.ru*

*Siberian State Transport University,  
191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia*

## **MECHANICAL-AND-PHYSICAL PROPERTIES OF SUBGRADE SOIL AND PAVEMENT DEFORMATION**

The paper presents the research results carried out into the pavement and subgrade surface on K-17r main trunk highway sections with conduit pipes. It is shown that the soil properties of the subgrade have an effect on the deformation processes of the pavement in places of the conduit pipe arrangement. The mechanical-and-physical properties and deformation parameters are determined in the paper. It is found that the pavement deformations are observed in 93 % of cases in places of the conduit pipe arrangements which are induced by soil loosening.

**Keywords:** pavement road surface; uniform running surface; subgrade; conduit pipe.

На участках автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб в течение циклов замораживание-оттаивание возникают неравномерные деформации грунта, происходящие под влиянием таких факторов, как транспортные нагрузки, погодно-климатические условия, неработоспособное состояние конструктивных частей водопропускных труб. В свою очередь, это приводит к деформациям дорожной одежды, т. е. к нарушению ровности покрытия (рис. 1).



*Рис. 1.* Деформации покрытия в виде просадки в местах устройства водопрпускных труб

При нарушении ровности покрытия автомобильная дорога перестает отвечать нормативным требованиям, предъявляемым к ней, т. е. нарушается её работоспособность и безопасность [1–5].

Причинами нарушения ровности покрытия дорожных одежд являются недостаточная степень уплотнения грунта при строительстве, образование разуплотненных зон земляного полотна при эксплуатации автомобильной дороги, морозное пучение грунтов, при котором развиваются неравномерные деформации полотна дороги, ускоряющие разрушение дорожной одежды [6–9]. Особенно это характерно на участках автомобильной дороги в местах устройства водопрпускных труб с учётом территориальной однородности географических комплексов [10]. Выполненные до настоящего времени исследования не в полной мере отражают влияние физико-механических характеристик грунта земляного полотна в местах устройства водопрпускных труб на процесс образования деформаций дорожной одежды нежесткого типа и способствуют разработке методов восстановления транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги, не прибегая к дорогостоящему капитальному ремонту [11–14]. В связи с этим проведенные авторами исследования являются актуальными.

Особенности работы дорожных одежд определены по результатам визуальных исследований на 15 участках автомобильной дороги (а/д) «К-17р», расположенной на юго-западе Новосибирской области (НСО). Анализ исходных данных, в том числе полученных в результате рекогносцировочного обследования, позволил сделать вывод, что, в 93 % рассмотренных случаев на дорожной одежде в местах устройства водопрпускных труб присутствуют деформации в виде просадок покрытия, трещин, выбоин.

Следует отметить, что к просадке дорожной одежды и нарушениям эксплуатационных показателей автомобильной дороги приводят деформации, возникающие в нижележащих слоях земляного полотна.

При сопоставлении характеристик земляного полотна (табл. 1) и физико-механических характеристик грунта были выделены инженерно-геологические элементы ИГЭ-1, ИГЭ-2, ИГЭ-3:

ИГЭ-1 – асфальтобетон мощностью 0,08–0,13 м (на протяжении всего рассматриваемого участка);

ИГЭ-2 – гравийно-щебеночная смесь мощностью 0,14–0,41 м (на протяжении всего рассматриваемого участка);

ИГЭ-3 – земляное полотно отсыпано суглинком легким пылеватым твердым с прослоями полутвердого с примесью органических веществ 5–6 %. Влажность грунта колеблется в интервале от 0,15 до 0,20. Коэффициент пористости – от 0,527 до 0,911.

Плотность грунта составляет от 1,68 до 1,92 г/см<sup>3</sup> на участках, удаленных от водопропускной трубы, и от 1,7 до 2,05 г/см<sup>3</sup> на участках вблизи водопропускной трубы.

Таблица 1

**Толщина конструктивных слоев земляного полотна на участках устройства водопропускных труб от км 20+000 до км 335+000 а/д «К-17р»**

№ п/п	Материал слоя	h слоя, см
км 20 а/д «К-17р»		
1	Бетонная крошка фракцией от 6 до 8 см	8
2	ЩПС фракцией от 40 до 70 мм	10
3	Насыпной грунт с включениями мелкого щебня	25
	Грунт земляного полотна	
км 44 а/д «К-17р»		
1	Мелкий щебень фракцией от 1 до 3 см	1
2	Насыпной грунт с включениями мелкого щебня	10
3	Щебень фракцией от 5 до 7 см	15
4	Супесь с включениями мелкого щебня	20
км 72 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 3 до 7 см с включениями насыпного грунта	30
2	Щебень фракцией от 5 до 7 см	40
км 156 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см с включениями органики, насыпного грунта	18
2	Насыпной грунт с включениями мелкого щебня и органики	13
3	Щебень фракцией до 5 см	10
4	Супесь с включениями мелкого щебня	19
км 171 а/д «К-17р»		
1	Щебень насыпной фракцией до 5 см	5
2	Щебень с включениями мелкого щебня и органики	7
3	Насыпной грунт с включениями дресвы	12
4	Насыпной грунт	20
5	Щебень фракцией от 5 до 7 см	23

Окончание табл. 1

№ п/п	Материал слоя	h слоя, см
км 180 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	12
2	Насыпной грунт с включениями мелкого щебня	24
км 182 а/д «К-17р»		
1	Щебень насыпной фракцией до 4 см	6
2	Щебень с включениями мелкого щебня и органики	5
3	Насыпной грунт с включениями дресвы	18
км 201 а/д «К-17р»		
1	Мелкий щебень, пыль	2
2	Щебень фракцией от 5 до 7 см	12
3	Суглинок с включениями мелкого щебня	12
4	Суглинок черно-коричневого цвета	12
5	Суглинок светло-коричневого цвета	12
6	Песок с каменистыми включениями	2
км 205 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	10
2	Насыпной грунт с включениями дресвы	12
3	Щебень фракцией от 5 до 7 см	17
км 226 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	14
2	Насыпной грунт с включениями мелкого щебня	12
3	Песок с каменистыми включениями	7
км 228 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	12
2	Щебень с включениями мелкого щебня и органики	7
3	Насыпной грунт с включениями дресвы	12
км 289 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	11
2	Насыпной грунт с включениями мелкого щебня	18
3	Щебень насыпной фракцией до 5 см	10
км 303 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	14
3	Насыпной грунт с включениями мелкого щебня	25
км 327 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	15
2	Щебень с включениями мелкого щебня и органики	7
3	Песок с каменистыми включениями	5
км 334 а/д «К-17р»		
1	Щебень фракцией от 5 до 7 см	12
2	Щебень насыпной фракцией до 5 см	11
3	Насыпной грунт с включениями дресвы	14

По полученным значениям плотности сухого грунта были составлены таблицы для каждого рассматриваемого участка. Для наглядности значения плотности сухого грунта представлены в виде графиков изменения плотности  $\rho_d$  (г/см<sup>3</sup>) по глубине проходки шурфа. Результаты по км 20 а/д «К-17р» приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Определение плотности сухого грунта на участках а/д «К-17р»

Таблица значений плотности сухого грунта из Ш-1 и Ш-4/Ш-2 и Ш-3			Сравнение графиков плотности сухого грунта по глубине проходки шурфов Ш-1 и Ш-4/Ш-2 и Ш-3
км 20 а/д «К-17р»			
$h, \text{ м}$	Ш-1 (вблизи трубы) Плотность сухого грунта $\rho_d, \text{ г/см}^3$	Ш-4 (на расстоянии 30 м от трубы) Плотность сухого грунта $\rho_d, \text{ г/см}^3$	
0,2	1,68	1,67	
0,7	1,55	1,62	
1,2	1,45	1,60	
1,9	1,52	1,51	
$h, \text{ м}$	Ш-2 (вблизи трубы) Плотность сухого грунта $\rho_d, \text{ г/см}^3$	Ш-3 (на расстоянии 30 м от трубы) Плотность сухого грунта $\rho_d, \text{ г/см}^3$	
0,2	1,69	1,68	
0,7	1,57	1,61	
1,2	1,49	1,58	
1,9	1,59	1,59	

По различию значений плотности грунта затрубного пространства и земляного полотна на участках, удаленных от водопропускной трубы, можно сделать вывод о наличии разуплотненных зон, находящихся в затрубном пространстве водопропускных труб.

Определены также механические характеристики грунтов: угол внутреннего трения  $\varphi$ , град, удельное сцепление  $C$ , кПа, и предел прочности на одноосное сжатие  $R$ , МПа. Результаты исследований сведены в ведомости физико-механических свойств грунтов для каждого участка. В табл. 3 приведены значения указанных параметров на участке км 20 а/д «К-17р».

Таблица 3

**Определение механических параметров грунтов земляного полотна  
на участках а/д «К-17р»**

№ п/п	№ выработки	Глубина отбора проб, м	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, МПа	Модуль деформации, МПа
№	Ш	<i>H</i>	$\rho$	$\phi$	<i>C</i>	<i>E</i>
км 20 а/д «К-17р»						
1	Ш-1	0,2	1,86	30,8	0,019	8,4
2	Ш-1	0,7	1,71	28,8	0,016	6,1
3	Ш-1	1,2	1,58	26,6	0,012	4,8
4	Ш-1	1,9	1,70	28,2	0,015	5,9
5	Ш-2	0,2	1,89	31,0	0,019	8,5
6	Ш-2	0,7	1,74	28,9	0,016	6,6
7	Ш-2	1,2	1,64	27,2	0,013	4,9
8	Ш-2	1,9	1,70	29,2	0,016	6,9
9	Ш-3	0,2	1,86	30,6	0,018	8,5
10	Ш-3	0,7	1,77	30,3	0,017	7,1
11	Ш-3	1,2	1,72	29,0	0,016	6,7
12	Ш-3	1,9	1,75	30,1	0,017	6,9
13	Ш-4	0,2	1,89	29,9	0,015	6,8
14	Ш-4	0,7	1,80	30,5	0,018	6,4
15	Ш-4	1,2	1,78	30,2	0,017	7,0
16	Ш-4	1,9	1,69	27,5	0,013	5,5

Сравнительное исследование деформационных параметров грунтов выполнено по стандартной методике. Определены такие деформационные характеристики грунтов, как модуль деформации  $E$  и модуль упругости  $E_{упр}$ . Исследовались грунты с участков автомобильной дороги в местах устройства водопропускных труб. По результатам испытаний и расчетов условного динамического сопротивления грунта были составлены таблицы для каждой точки. Для наглядности результаты динамического зондирования представлены в виде графиков изменения условного динамического сопротивления  $P_d$  по глубине зондирования (табл. 4).

Анализируя результаты динамического зондирования, можно заметить резкие скачки и пики условного динамического сопротивления в интервалах глубин от 0,5 до 2,0 м в ТДЗ № 1 и ТДЗ № 2, расположенных в пазухах водопропускной трубы. При этом в рассмотренном слое условное динамическое сопротивление грунтов в среднем составляет 2 МПа. В ТДЗ № 3 и ТДЗ № 4 на этих же глубинах динамическое сопротивление грунтов в среднем составляет 5,2 МПа, что подтверждает вывод о наличии разуплотненных зон в затрубном пространстве водопропускных труб рассматриваемого участка, высота насыпи которого составляет 2,58 м.

Таблица 4

## Результаты динамического зондирования на участках а/д «К-17р»

Сравнение графиков динамического зондирования грунтов затрубного пространства и земляного полотна по ходу километража	Сравнение графиков динамического зондирования грунтов затрубного пространства и земляного полотна против хода километража
20 км а/д «К-17р»	
<p><i>Примечание:</i></p> <p>■ – в ТДЗ № 2 (на расстоянии 10 см от Ш. № 2)</p> <p>■ – в ТДЗ № 3 (на расстоянии 30 м от оси трубы)</p>	<p><i>Примечание:</i></p> <p>■ – в ТДЗ № 1 (на расстоянии 10 см от Ш. № 1)</p> <p>■ – в ТДЗ № 4 (на расстоянии 30 м от оси трубы)</p>

При сравнении графиков ТДЗ № 1 и ТДЗ № 4; ТДЗ № 2 и ТДЗ № 3 становятся заметны существенные отличия. Разница степени уплотненности грунтов земляного полотна проявляется в области затрубного пространства водопропускных труб.

Проведенный анализ проблемы позволил выдвинуть гипотезу о том, что первопричиной образования деформаций дорожной одежды в местах устройства водопропускных труб является наличие разуплотненных зон. Для устранения данной проблемы предлагается использовать метод напорной инъекции, который позволит создать в теле земляного полотна укрепленный массив грунта, воспринимающий давление от верхнего рабочего слоя земляного полотна и транспортной нагрузки и передающий его на основание.

Для ее подтверждения в дальнейшем необходимо провести исследования, чтобы оценить степень эффективности использования данной конструкции, определить границы ее применения, а также получить зависимости, позволяющие выполнять проектирование упрочнения земляного полотна с использованием данного способа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каменчуков, А.В. Оценка работоспособности дорожных одежд/ А.В. Каменчуков, К.И. Богдановская // Международный сборник научных трудов Дальний Восток. Авто-

- мобильные дороги и безопасность движения / под ред. А.И. Ярмолинского. – Хабаровск, 2015. – С. 59–62.
2. Карелина, Е.Л. Определение причин нарушения ровности покрытия дорожной одежды на участках устройства водопропускных труб / Е.Л. Карелина // Политранспортные системы : материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки России. – Новосибирск, 2015. – С. 287–293.
  3. Николенко, Д.А. Прогнозирование деформаций и разрушений дорожных конструкций автомобильных дорог / Д.А. Николенко, А.Г. Кмега // Строительство. – Ростов н/Д, 2014. – С. 35–36.
  4. Немчинов, М.В. Физика и динамика работы дорожной одежды автомобильных дорог / М.В. Немчинов // Техполиграфцентр. – М., 2012. – 102 с.
  5. Сухоруков, А.В. Обоснование региональных норм проектирования дорожных одежд с учётом изменчивости геоконструкций территорий / А.В. Сухоруков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 4. – С. 159–169.
  6. Пай, В.Э. Составление каталога дефектов земляного полотна и дорожной одежды для назначения восстановительных работ на основе нового подхода / В.Э. Пай // Неделя науки – 2014. Наука МИИТа – транспорту : научно-практическая конференция. Ч. 1. – М., 2014. – С. II/36–II/37.
  7. Васильев, А.Е. Существующие методы оценки прочности нежестких дорожных одежд и грунта земляного полотна / А.Е. Васильев // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2013. – № 1. – С. 418–424.
  8. Щепотин, Г.К. Повышение морозоустойчивости земляного полотна автомобильных дорог / Г.К. Щепотин, Н.А. Машкин // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 3. – С. 85–91.
  9. Стандартизация расчетных значений характеристик глинистых грунтов Кузбасса для обеспечения качества проектирования автомобильных дорог / С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко, М.В. Бадина, А.В. Сухоруков, В.С. Чурилин, А.О. Афиногенов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 5. – С. 173–183.
  10. Ефименко, С.В. Учёт территориальной однородности географических комплексов при проектировании автомобильных дорог / С.В. Ефименко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3. – С. 226–236.
  11. Разуваев, Д.А. Совершенствование метода проектирования дорожных одежд при стабилизации рабочего слоя земляного полотна (на примере Новосибирской области) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск : СГУПС, 2013. – 24 с.
  12. Давыдов, А.Н. Учет особенностей водно-теплого режима земляного полотна в местах расположения бесканальных тепловых сетей для обеспечения требуемых сроков службы дорожных одежд : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. : МАДИ, 2011. – 22 с.
  13. Немчинов, М.В. Мелочей быть не может. О содержании водоотводных сооружений автомобильных дорог / М.В. Немчинов, М. Ивановски, Ань Ву Туан // Автомобильные дороги. – 2008. – № 4. – С. 99–101.
  14. *GPR analysis of clayey soil behaviour in unsaturated conditions for pavement engineering and geoscience applications* / F. Tosti, A. Benedetto, L.B. Ciampoli, S. Lambot, C. Patriarca, E.C. Slob // *Near surface geophysics*, T.: 14, в 2. – P. 127–144.

#### REFERENCES

1. *Kamenchukov A.V., Bogdanovskaya K.I. Otsenka rabotosposobnosti dorozhnykh odezhd* [Assessment of road pavement performance]. Coll. Int. Papers 'Automobile Roads and Traffic Safety'. Khabarovsk, 2015. Pp. 59–62.(rus)
2. *Karelina E.L. Opredelenie prichin narusheniya rovnosti pokrytiya dorozhnoi odezhdy na uchastkakh ustroystva vodopropusknykh trub* [Unevenness cause identification of pavement surface in places of conduit pipe arrangement]. *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Sci. Conf. 'Multi-Transportation Systems'*. Novosibirsk, 2015. Pp. 287–293. (rus)



3. *Nikolenko D.A., Kmeta A.G.* Prognozirovanie deformatsii i razrushenii dorozhnykh konstrukttsii avtomobil'nykh dorog. [Prediction of deformation and destruction of road structures]. Stroitel'stvo. Rostov-on-Don, 2014. Pp. 35–36. (rus)
4. *Nemchinov M.V.* Fizika i dinamika raboty dorozhnoi odezhdy avtomobil'nykh dorog [Physics and dynamics of road pavement behavior]. Tehpoligrafcentr. Moscow, 2012. Pp. 102. (rus)
5. *Sukhorukov A.V.* Obosnovanie regional'nykh norm proektirovaniya dorozhnykh odezhd s uchedom izmenchivosti geokompleksa territorii [Regional standards for pavement design accounting for geographic complex volatility]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 4. Pp. 159–169. (rus)
6. *Pai V.E.* Sostavlenie kataloga defektov zemlyanogo polotna i dorozhnoi odezhdy dlya naznacheniya vosstanovitel'nykh rabot na osnove novogo podkhoda [Indexing of subgrade and pavement defects for road reconditioning using new approach]. *Proc. Sci. Conf. 'Science Week – 2014. MIIT Science for Transport'*. Moscow, 2014. Pt. 1. Pp. II/36–II/37. (rus)
7. *Vasil'ev A.E.* Sushchestvuyushchie metody otsenki prochnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd i grunta zemlyanogo polotna [Strength evaluation methods for non-rigid pavements and subgrade soil]. *Dal'nii Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2013. No. 1. Pp. 418–424. (rus)
8. *Shchepotin G.K., Mashkin N.A.* Povyshenie morozoustoichivosti zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog. [Improvement of subgrade frost resistance]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 3. Pp. 85–91. (rus)
9. *Efimenko S.V., Efimenko, V.N., Badina, M.V., Sukhorukov, A.V., Churilin, V.S., Afinogenov A.O.* Standartizatsiya raschetnykh znachenii kharakteristik glinistykh gruntov Kuzbassa dlya obespecheniya kachestva proektirovaniya avtomobil'nykh dorog [Standardization of estimated values of clayey soil properties for the quality assurance in road design in Kuzbass]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 5. Pp. 173–183. (rus)
10. *Efimenko S.V.* Uchet territorial'noi odnorodnosti geograficheskikh kompleksov pri proektirovanii avtomobil'nykh dorog [Territorial homogeneity of geographic complexes in design of automobile roads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 3. Pp. 226–236. (rus)
11. *Razuvaev D.A.* Sovershenstvovanie metoda proektirovaniya dorozhnykh odezhd pri stabilizatsii rabocheho sloya zemlyanogo polotna (na primere Novosibirskoi oblasti): avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improvement of pavement design method in stabilizing subgrade layer in Novosibirsk region]. PhD Abstract]. Novosibirsk, SSTU Publ., 2013. Pp. 24. (rus)
12. *Davidyak A.N.* Uchet osobennostei vodno-teplovogo rezhima zemlyanogo polotna v mestakh raspolozheniya beskanal'nykh teplovykh setei dlya obespecheniya trebuemykh srokov sluzhby dorozhnykh odezhd: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Hydro-thermal mode of subgrade with duct-free heat networks. PhD Thesis]. Moscow, MADI Publ., 2011. Pp. 22. (rus)
13. *Nemchinov M.V., Ivan'ski M., An' Vu Tuan* Melochei byt' ne mozhet. O sodержanii vodootvodnykh sooruzhenii avtomobil'nykh dorog [Drainage structures of roads]. *Avtomobil'nye dorogi*. 2008. No. 4. Pp. 99–101. (rus)
14. *Tosti F., Benedetto A., Tsiampoli L.B., Lambot S., Patriartsa Ts., Slob E.Ts.* GPR analysis of clayey soil behaviour in unsaturated conditions for pavement engineering and geoscience applications. *Near Surface Geophysics*. 2016. V. 14. Pp. 127–144.