

Определение характеристик балластных шлейфов в условиях Западно-Сибирской железной дороги

Поступила	21.02.2018
Рецензирование	16.03.2018
Принята к печати	19.04.2018

В статье рассматривается проблема определения характеристик балластных шлейфов на откосах длительно эксплуатируемого земляного полотна. Балластные шлейфы представляют собой насыпные техногенные грунты, зачастую выгружаемые на откос при проведении работ по ремонту пути. Развитые балластные шлейфы нередко вызывают сплывы откосов насыпей, однако их физико-механические характеристики в настоящее время изучены недостаточно.

Выполненный комплекс полевых и лабораторных исследований с их дальнейшей камеральной обработкой позволил выделить три основных типа балластных шлейфов и определить их физико-механические характеристики. В качестве основных типов шлейфов на Западно-Сибирской железной дороге выделены следующие: загрязненный щебеночный балластный материал с песчано-глинистым заполнителем, загрязненный асбестовый балластный материал и щебеночный балластный материал, загрязненный песчано-глинистыми частицами и угольной пылью.

По результатам проведенных исследований получены зависимости физических и прочностных характеристик от условного динамического сопротивления грунта. Полученные зависимости коэффициента пористости от динамического сопротивления описываются экспоненциальной функцией, зависимости прочностных характеристик от условного динамического сопротивления – линейной.

Кроме того, в результате проведения экспериментальных исследований разработана методика определения характеристик балластных шлейфов динамическим зондированием в условиях Западно-Сибирской железной дороги. Разработанная методика позволяет определять характеристики соответствующих видов балластных шлейфов, необходимые для выполнения расчетов устойчивости. Предложенная методика была апробирована на железнодорожных объектах и показала высокую эффективность.

Ключевые слова: *земляное полотно, балластные шлейфы, прочность грунта, полевые исследования, динамическое зондирование.*

В современных условиях роста осевых и погонных нагрузок, действующих на земляное полотно, актуальными являются вопросы предупреждения и устранения дефектов и деформаций земляного полотна [1, 2]. Согласно инструкции ЦП-544 [3] одним из конструктивных дефектов длительно эксплуатируемого земляного полотна является наличие балластных шлейфов на откосах, вследствие чего откосы имеют завышенную крутизну. Перегрузка откосов балластными материалами может привести к их сплывам (рис. 1), что угрожает безопасности движения поездов.

Причины образования балластных шлейфов различны. Основной из них является накопление на откосах грязного балласта, выгружаемого при проведении капитальных и средних ремонтов, а также реконструкции. Именно по этой причине в конце прошлого столетия при массовом переходе с асбестового балласта на щебеночный на большом количестве участков были сформированы шлейфы.

Для выполнения расчетов устойчивости земляного полотна требуется достоверное определение характеристик слагающих его грунтов. Однако характеристики балластных шлейфов при инженерно-геологических обследованиях зачастую принимаются в соответствии с архивными материалами по аналогичным грунтам ввиду трудоемкости производства испытаний по определению прочностных характеристик крупнообломочных грунтов. В связи с этим для повышения обоснованности принимаемых решений по обеспечению надежности насыпей с балластными шлейфами необходимо разработать экспресс-методику определения их физико-механических характеристик [4].

Задачей настоящего исследования является разработка методики определения физико-механических характеристик балластных шлейфов.

Анализ результатов инженерно-геологических обследований по Западно-Сибирской железной дороге показал, что среди всего разнообразия отложений балластных шлейфов

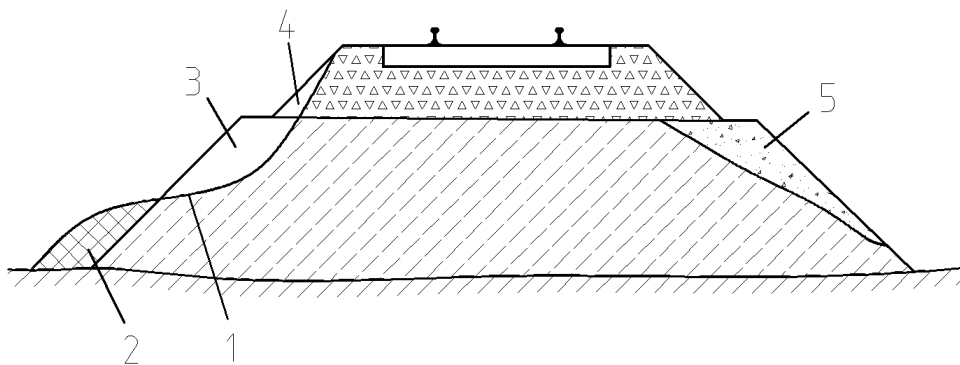


Рис. 1. Сплыв откоса насыпи:

1 – поверхность смещения; 2 – сместившийся грунт (балластный шлейф); 3 – нарушенная часть откоса; 4 – поврежденная часть балластной призмы; 5 – балластный шлейф

согласно ГОСТ 25100–2011 можно выделить три основные группы:

1) щебенистый грунт загрязненный, с песчано-глинистым заполнителем с примесью органических веществ (загрязненный щебеночный балластный материал);

2) дресвяный грунт с песчаным заполнителем с примесью органических веществ (загрязненный асбестовый балластный материал);

3) дресвяный грунт с песчано-глинистым заполнителем с примесью угольной пыли (щебеночный балластный материал, загрязненный песчано-глинистыми частицами и угольной пылью).

Для детального изучения свойств материалов балластных шлейфов каждого вида на основании анализа результатов обследований прошлых лет были выбраны три характерных объекта:

1) перегон Издревая – Жеребцово – для изучения свойств загрязненного щебеночного балластного материала;

2) перегон Байкаим – Ленинск-Кузнецкий-II – для изучения свойств загрязненного асбестового балластного материала;

3) перегон Тягун – Аламбай – для изучения свойств щебеночного балластного материала, загрязненного песчано-глинистыми частицами и угольной пылью.

Поскольку в настоящее время отсутствует нормативная база для определения физико-механических характеристик балластных шлейфов, предварительно были проанализированы методы определения физических и прочностных характеристик крупнообломочных грунтов.

Для оценки мощности шлейфов наиболее надежным и достоверным способом является

проходка закопушек и шурфов с заглублением в грунт земляного полотна не менее 20 см. При проходке выработок отбирались пробы материала, слагающего шлейфы (при многослойном строении шлейфа пробы отбираются из каждого слоя), а также пробы грунта земляного полотна в месте контакта с балластным шлейфом и на дне шурфа.

Определение мощности шлейфа возможно с применением динамического зондирования (при наличии в грунте частиц крупнее 10 мм не более 40 % по массе в соответствии с ГОСТ 19912–2012 [5]). Сущность метода испытаний грунтов динамическим зондированием заключается в следующем. При помощи специальной установки, обеспечивающей внедрение зонда ударным способом, измеряется глубина погружения зонда в зависимости от числа ударов молота [6]. По полученным в ходе испытания данным вычисляется условное динамическое сопротивление грунта. В зависимости от вида грунта и типа зонда также возможно рассчитать физические (коэффициент пористости) и механические характеристики грунта, установив корреляционную зависимость с прямыми методами [7].

Кроме того, при определении параметров залегания балластных шлейфов рекомендуется применять геофизические методы с привязкой к пройденным горным выработкам, что позволит оценить мощность шлейфа на обследуемом участке не точечно, а по его простиранию [8].

Физические характеристики шлейфов определены в полевых и лабораторных условиях. Плотность сложения грунтов шлейфов ввиду их гранулометрического состава определялась

только в полевых условиях с помощью метода замещения объема.

В лабораторных условиях определена плотность пылевато-глинистых частиц грунта (пикнометрическим методом) и крупнообломочных включений (методом взвешивания частиц в воде), влажность (и при наличии глинистых частиц – влажность на границе текучести и раскатывания заполнителя), грануло-метрический состав.

Для определения прочностных характеристик крупнообломочных грунтов выполнялся срез целиков грунта. Испытание проведено в соответствии с ГОСТ 20276–2012 [9]. Для построения прямой прочности при испытании однородного грунта проводилось не менее трех испытаний целиков при различных значениях нормального давления. Схема испытания представлена на рис. 2.

Согласно представленной схеме для вычисления полных нормальных и касательных нагрузок вес штампа и грузов G следует спроецировать на оси, параллельную и перпендикулярную плоскости среза.

По измеренным в процессе испытаний значениям нормальной и касательной нагрузок вычисляют касательные и нормальные напряжения по формулам (8.1) и (8.2), приведенным в [9].

Испытания проводились на откосе железнодорожной насыпи (рис. 3), при этом основные нормальные и касательные нагрузки прикладывались посредством установки тарированных грузов известной массы на штамп.

Дополнительная касательная нагрузка прикладывалась домкратом.

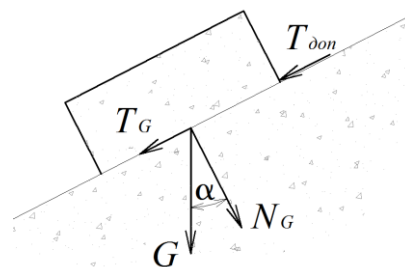


Рис. 2. Схема испытания среза целиков грунта: G – вес штампа и грузов, кН; α – угол наклона откоса к горизонту; T_G и N_G – проекции нагрузки на оси, параллельную и перпендикулярную плоскости среза, кН; $T_{дон}$ – касательная нагрузка, передаваемая на кольцо домкратом, кН

Таким образом, в полевых и лабораторных условиях были определены физико-механические характеристики грунтов различных видов балластных шлейфов насыпей на Западно-Сибирской железной дороге в естественном и насыщенном водой состояниях. Ниже представлены результаты проведенных испытаний.

Щебенистый грунт загрязненный, с песчано-глинистым заполнителем с примесью органических веществ (шлейф № 1) при замачивании не достиг полного водонасыщения ввиду высокого коэффициента фильтрации. Характеристики данного материала представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Согласно полученной кривой гранулометрического состава грунт неоднородный [10]



Рис. 3. Испытание балластных шлейфов срезом целиков

Таблица 1

Характеристики грунтов, полученные по результатам испытаний шлейфа № 1

Состояние	ρ_s , г/см ³	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	n	e	W , д.е.	S_r	ϕ , град	C , кПа
Естеств.	2,66	1,66	1,53	42	0,757	0,08	0,29	21,9	6,7
Водонасыщ.	2,66	1,68	1,48	44	0,801	0,14	0,45	21,9	7,0

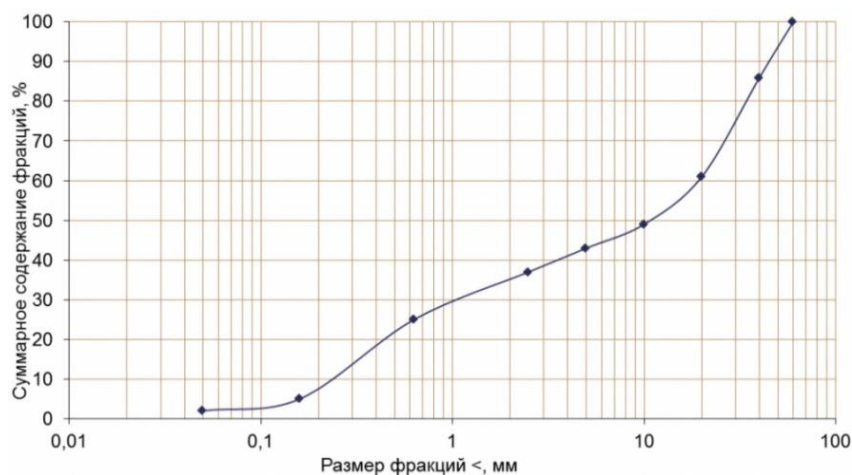


Рис. 4. Кривая гранулометрического состава шлейфа № 1

(степень неоднородности $C_u = 91$). Относительное содержание органических веществ в заполнителе составляет 10 %.

Таким образом, для щебенистого грунта балластных шлейфов физические и прочностные характеристики достаточно близки как в естественном состоянии, так и при замачивании.

По результатам проведенных испытаний дресвяный грунт (асбест) с песчаным заполнителем с примесью органических веществ (шлейф № 2) имеет характеристики, представленные в табл. 2 и на рис. 5.

Согласно полученной кривой гранулометрического состава грунт неоднородный [10]

Таблица 2

Характеристики грунтов, полученные по результатам испытаний шлейфа № 2

Состояние	ρ_s , г/см ³	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	n	e	W , д.е.	S_r	ϕ , град	C , кПа
Естеств.	2,55	1,65	1,52	40	0,676	0,09	0,32	32,1	5,2
Водонасыщ.	2,55	1,89	1,50	41	0,701	0,26	0,94	24,2	5,6

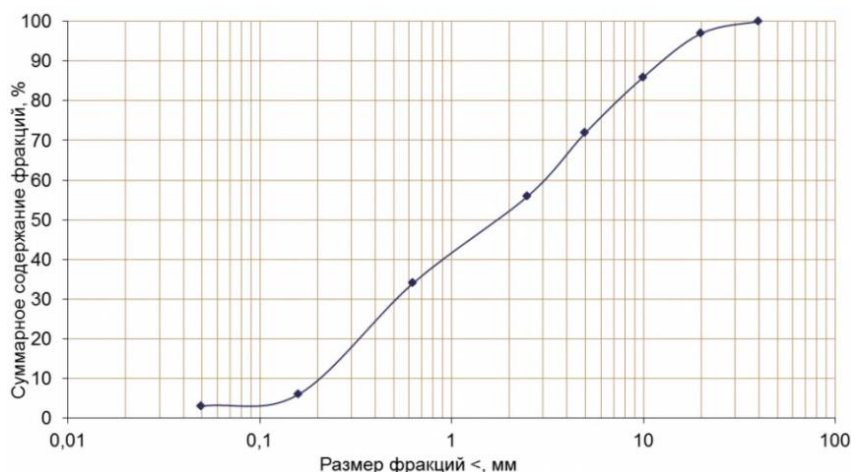


Рис. 5. Кривая гранулометрического состава шлейфа № 2

Таблица 3

Характеристики грунтов, полученные по результатам испытаний шлейфа № 3

Состояние	ρ_s , г/см ³	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	n	e	W , д.е.	S_r	φ , град	C , кПа
Естеств.	2,50	1,50	1,39	44	0,800	0,08	0,26	35,3	6,0
Водонасыщ.	2,50	1,69	1,37	45	0,829	0,24	0,72	24,9	6,0

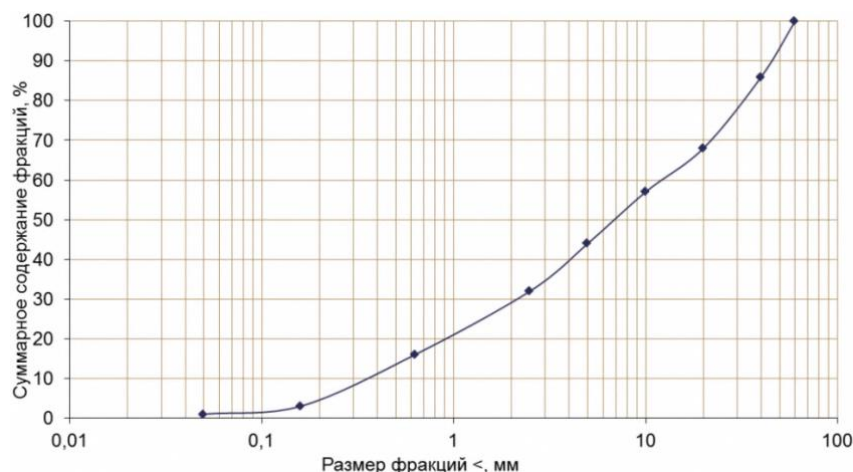


Рис. 6. Кривая гранулометрического состава шлейфа № 3

(степень неоднородности $C_u = 15$). Относительное содержание органических веществ в заполнителе составляет 34 %, их значительная доля приходится на частицы угля. Для данного грунта насыщение водой привело к снижению угла внутреннего трения на 24,6 %.

Дресвяный грунт с песчано-глинистым заполнителем с примесью угольной пыли (шлейф № 3) по результатам проведенных испытаний имеет характеристики, представленные в табл. 3 и на рис. 6.

Согласно полученной кривой гранулометрического состава грунт неоднородный [10] (степень неоднородности $C_u = 48$). Относительное содержание органических веществ в заполнителе составляет до 50 % (частицы угля). Для данного грунта насыщение водой привело к снижению угла внутреннего трения на 29,5 %.

Поскольку существующие в настоящее время методики определения физико-механических характеристик крупнообломочных (дресвяных и щебенистых) грунтов предусматривают проведение дорогостоящих и трудоемких экспериментов, рассмотрим возможность применения динамического зондирования. Общий вид установки приведен на рис. 7.

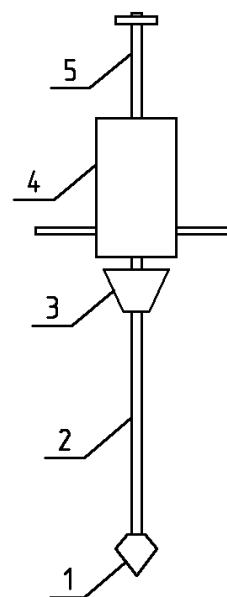


Рис. 7. Установка динамического зондирования:

1 – наконечник; 2 – штанги; 3 – подбоек;
4 – молот; 5 – направляющая

Для выявления корреляционных зависимостей результатов зондирования с физико-механическими характеристиками, полученными прямыми методами, испытания динамическим зондированием выполнялись рядом с точками испытаний целиков и определений плотности методом замещения объема.

По результатам исследований была получена экспоненциальная зависимость коэффициента пористости от условного динамического сопротивления, имеющая следующий вид:

$$e = e_0 \exp(-k_{в,с} P_d), \quad (1)$$

где e_0 – начальный коэффициент пористости, полученный эмпирическим путем; $k_{в,с}$ – коэффициент, учитывающий вид и состояние грунта; P_d – условное динамическое сопротивление при зондировании.

Значение коэффициента $k_{в,с}$ зависит от вида и состояния грунта, значение данного коэффициента следует определять на каждом участке опытным путем, при этом необходимо провести не менее шести прямых испытаний.

Экспоненциальные кривые, построенные по результатам проведенных экспериментальных исследований для трех рассматриваемых видов грунтов балластных шлейфов, приведены на рис. 8. Следует отметить, что полученные зависимости справедливы только для рассмотренного диапазона коэффициентов пористости – от 0,4 до 1,1.

После построения полученных зависимостей выполнялась проверка правильности полученных уравнений путем сравнения значения статистики с критическим значением соответствующего распределения Фишера при заданном уровне значимости [11]. Статистика F -теста сводится к отношению выборочных дисперсий.

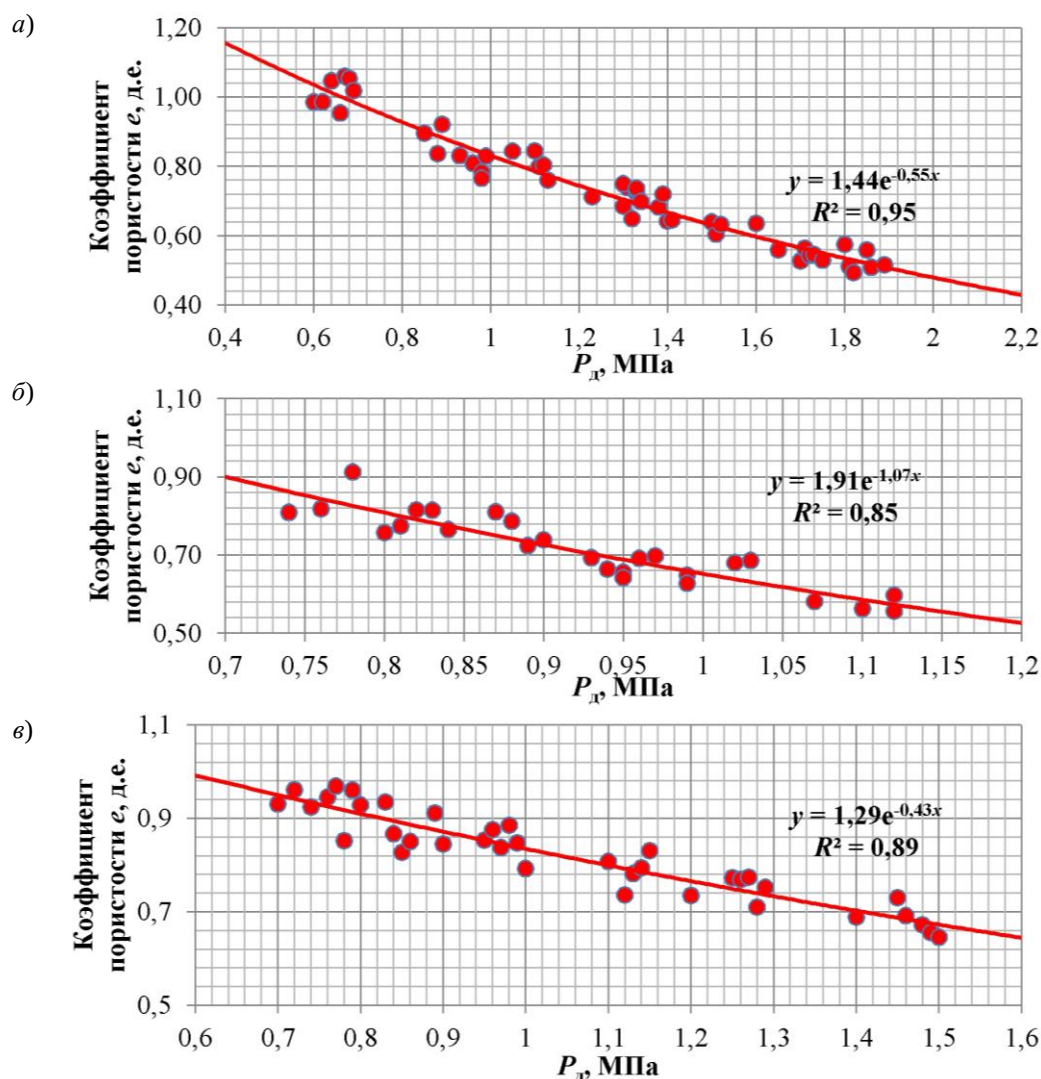


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента пористости грунтов от условного динамического сопротивления:
а – для шлейфа № 1; б – для шлейфа № 2; в – для шлейфа № 3

F -тест выполнен для каждой кривой, после проверки равенства их дисперсий статистика теста в каждом случае не превысила критического значения, соответствующего уровню значимости $\alpha = 0,05$. Вероятность $p(F)$ того, что случайная величина с данным распределением Фишера превысит данное значение статистики, для каждой кривой значительно выше заданного уровня значимости α , что подтверждает правильность полученных уравнений. Статистические показатели, полученные после проведения F -теста, приведены в табл. 4.

Кроме того, установлена корреляционная зависимость прочностных характеристик грунтов балластных шлейфов и условного динами-

ческого сопротивления посредством параллельно проведенных испытаний грунтов срезом целиков и испытаний динамическим зондированием. По результатам испытаний построены графики, приведенные на рис. 9–11. Полученные графики зависимостей представляют собой прямые вида:

$$\begin{aligned}\varphi &= k_{\text{в,с}}^{\varphi} P_{\text{д}} + K_{\varphi}; \\ C &= k_{\text{в,с}}^C P_{\text{д}} + K_C,\end{aligned}\quad (2)$$

где $k_{\text{в,с}}^{\varphi}$, $k_{\text{в,с}}^C$ – коэффициенты вида и состояния грунта, зависящие от гранулометрического состава, влажности и плотности сложения грунта; K_{φ} , K_C – эмпирические коэффициенты, полученные по результатам испытаний.

Таблица 4

Статистические показатели (F -тест) для уравнений зависимости коэффициентов пористости грунтов от условного динамического сопротивления

Статистический показатель	Шлейф № 1	Шлейф № 2	Шлейф № 3
Коэффициент корреляции r	0,98	0,92	0,94
F -критерий	1,046	1,181	1,140
Критическое значение $F_{\text{крит}}$	1,615	1,955	1,743
Вероятность $p(F)$	0,44	0,34	0,35
Уровень значимости α	0,05	0,05	0,05

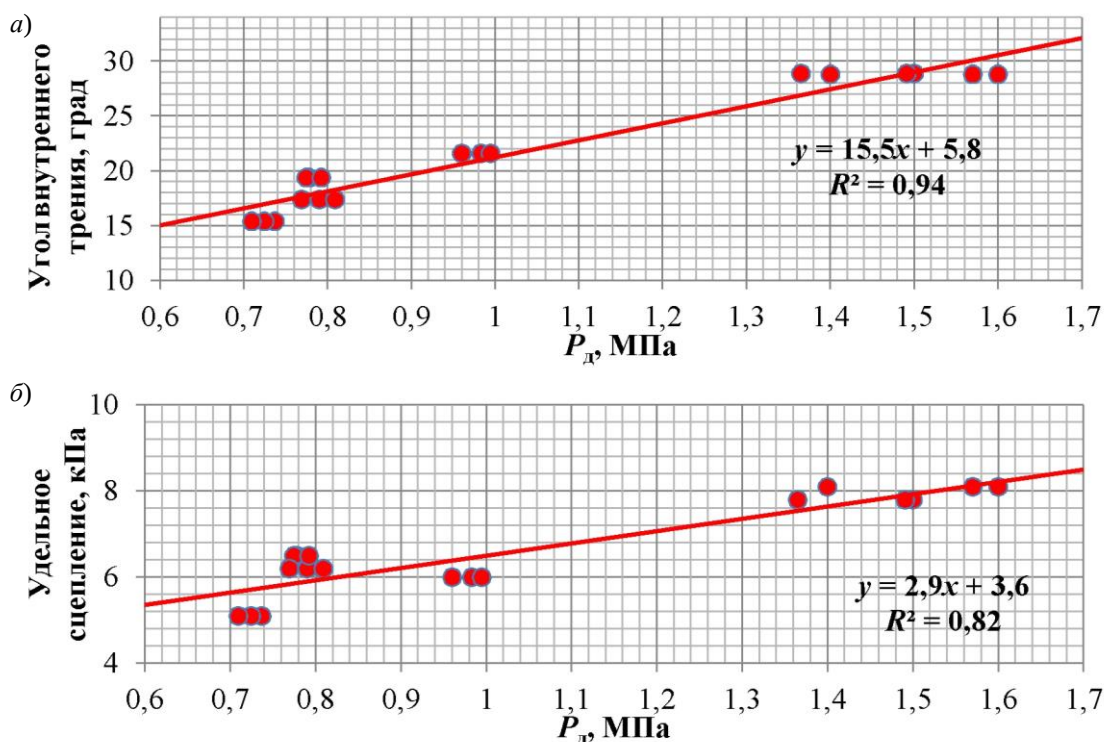


Рис. 9. Графики зависимости прочностных характеристик грунта от условного динамического сопротивления для шлейфа № 1:

a – угла внутреннего трения; b – удельного сцепления

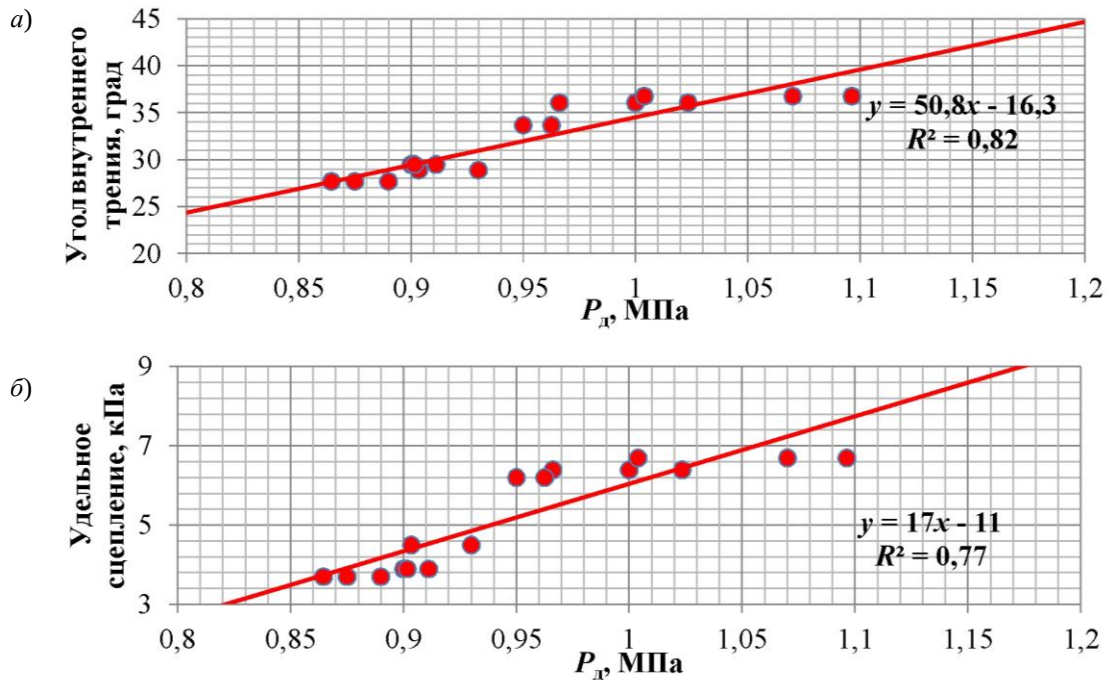


Рис. 10. Графики зависимости прочностных характеристик грунта от условного динамического сопротивления для шлейфа № 2:

а – угла внутреннего трения; б – удельного сцепления

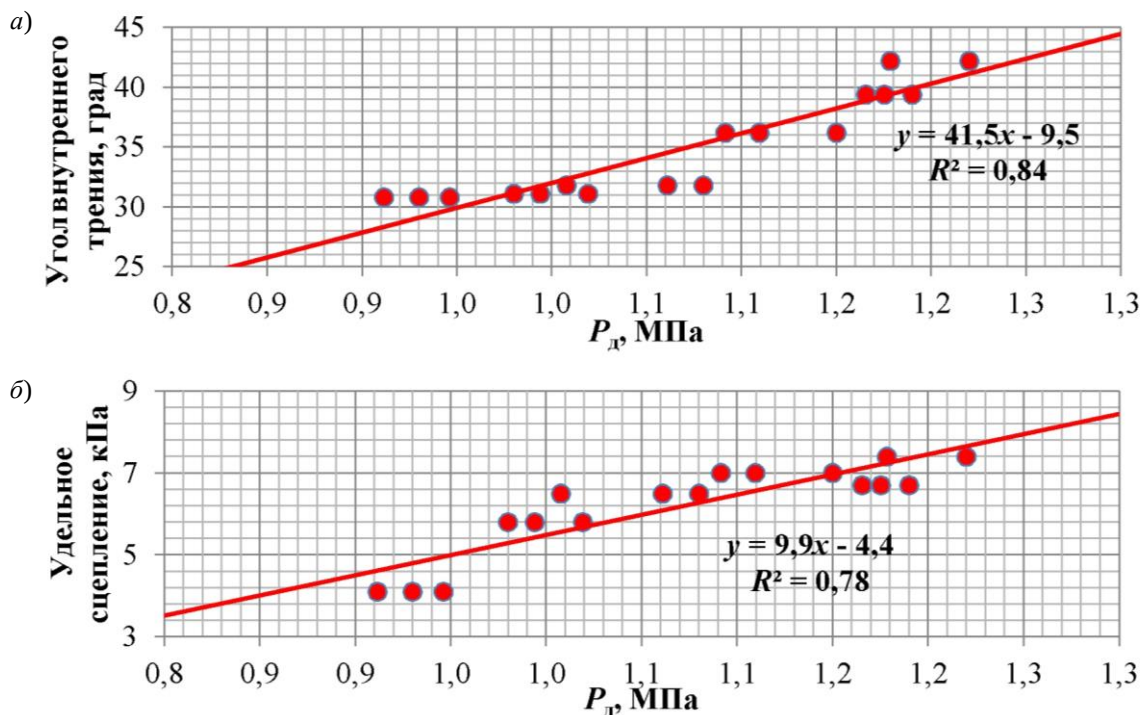


Рис. 11. Графики зависимости прочностных характеристик грунта от условного динамического сопротивления для шлейфа № 3:

а – угла внутреннего трения; б – удельного сцепления

Полученные зависимости прочностных характеристик грунта от условного динамического сопротивления справедливы только для

рассмотренного диапазона значений: для угла внутреннего трения – от 15 до 40 град, для удельного сцепления – от 3 до 8 кПа.

Таблица 5

Статистические показатели (F -тест) для уравнений зависимости прочностных характеристик грунтов от условного динамического сопротивления

Статистический показатель	Шлейф № 1		Шлейф № 2		Шлейф № 3	
	ϕ	C	ϕ	C	ϕ	C
Коэффициент корреляции r	0,97	0,91	0,90	0,88	0,92	0,88
F -критерий	1,06	0,84	1,23	1,30	1,19	1,27
Критическое значение $F_{\text{крит}}$	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
Вероятность $p(F)$	0,45	0,36	0,34	0,30	0,36	0,32
Уровень значимости α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Аналогично описанной выше методике проведен F -тест для каждого графика. Результаты обработки данных приведены в табл. 5.

Следовательно, построенные графики достаточно точно описывают результаты испытаний.

По результатам выполненных исследований определены физико-механические характеристики для трех выделенных типов балластных

шлейфов и разработана методика определения физических и прочностных характеристик исследованных видов шлейфов Западно-Сибирской дороги по результатам динамического зондирования. Предложенная методика была апробирована на указанных объектах железной дороги и показала высокую эффективность при проведении инженерно-геологических обследований земляного полотна.

Библиографический список

1. Ланис А. Л. Способы усиления земляного полотна инъектированием // Известия Транссиба. 2016. № 3. С. 117–124.
2. Ланис А. Л. Использование метода напорной инъекции для усиления земляного полотна железных дорог : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06. М., 2009. 152 с.
3. ЦП-544. Инструкция по содержанию земляного полотна железнодорожного пути. М. : Транспорт, 1998. 189 с.
4. Давыдова Т. В. Об устойчивости насыпей с балластными шлейфами // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе : тез. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2001. С. 282–283.
5. ГОСТ 19912–2012. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. М. : Стандартинформ, 2013. 13 с.
6. Руководство по электроконтактному динамическому зондированию грунтов. М. : ЦНИИС, 1983. 62 с.
7. Ланис А. Л. Диагностика и контроль качества упрочнения грунтового массива методом напорной инъекции // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2010. № 23. С. 98–101.
8. Технологический регламент диагностики и режимных наблюдений объектов земляного полотна для постоянной эксплуатации. М. : НИИТКД, 2007. 92 с.
9. ГОСТ 20276–2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М. : Стандартинформ, 2015. 46 с.
10. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. М. : Стандартинформ, 2013. 38 с.
11. Румицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М. : Наука, 1971. 192 с.

A. L. Lanis, L. O. Belyakov

Determination of Ballast Deposits Characteristics in Conditions of the West Siberian Railway

Abstract. The article examines the problems of the long-exploited roadbed, one of the defects of which is the presence of ballast deposits on the slopes. Ballast deposits are bulk man-made soils, often unloaded on a slope during railway repair works. Developed ballast deposits often cause slopes of embankment slopes, but their physical and mechanical characteristics are currently insufficiently studied.

The completed complex of field and laboratory studies with their further cameral processing made it possible to distinguish three main types of ballast deposits and determine their physico-mechanical characteristics. The main types of deposits on the West Siberian Railway are gravel-contaminated ballast material with sand-clay aggregate, contaminated asbestos ballast material and crushed ballast material contaminated with sandy-clay particles and coal dust.

Based on the results of the studies, the dependences of physical and strength characteristics on the conventional dynamic soil resistance were obtained; dynamic probing tests were performed near field test points. The obtained dependences of the void factor on the dynamic resistance are described by an exponential function, the dependence of the strength characteristics on the conditional dynamic resistance is linear.

In addition, as a result of the pilot studies, a technique has been developed for determining the characteristics of ballast deposits by dynamic sounding in the conditions of the West Siberian Railway. The developed technique allows determining the characteristics of the corresponding types of ballast deposits necessary to perform limit states calculations of the first and the second groups. The proposed methodology was tested at railway facilities and showed high efficiency.

Key words: *roadbed; ballast deposits; soil strength; field investigations; dynamic probing tests.*

Ланис Алексей Леонидович – кандидат технических наук, доцент, начальник управления научно-исследовательских работ СГУПС. E-mail: alangeo@bk.ru

Беляков Леонид Олегович – аспирант кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: lbelyakov@bk.ru