

УДК 625.141.1

Определение интенсивности накопления остаточных деформаций в балластной призме железнодорожного пути в зависимости от степени загрязнения щебеночного балласта угольной пылью

А. В. Качалкин, А. Ф. Колос

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Качалкин А. В., Колос А. Ф. Определение интенсивности накопления остаточных деформаций в балластной призме железнодорожного пути в зависимости от степени загрязнения щебеночного балласта угольной пылью // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 869–879. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-869-879

Аннотация

Цель: Определение интенсивности накопления остаточных деформаций в балластной призме в зависимости от степени ее загрязнения угольной пылью. **Методы:** В исследовании скорость накопления остаточных деформаций оценивалась коэффициентом μ , значения которого были получены на основе выполненных циклических трехосных испытаний в установке трехосного сжатия ГТ 1.3.7 и регрессионного анализа. **Результаты:** По данным лабораторных испытаний и регрессионного анализа были установлены значения коэффициента μ , характеризующего интенсивность (скорость) накопления остаточных деформаций в балластной призме. Исследования были выполнены как для чистого щебеночного балласта, так и для загрязненного угольной пылью при влажности 6 %. Результаты показывают, что с увеличением процента загрязнения балласта угольной пылью накопление остаточных деформаций происходит в 1,5 раза интенсивнее. На основе полученных значений коэффициента μ были выполнены расчеты по накоплению остаточных деформаций в балластном слое железнодорожного пути. Расчеты выполнялись с учетом наработки тоннажа 400 млн т брутто и при условии, что несущая способность основной площадки земляного полотна обеспечена, а осадка пути происходит только за счет деформаций балластной призмы. **Практическая значимость:** Результаты исследования дают возможность прогнозировать накопление остаточных деформаций в щебеночном балласте с наработкой тоннажа в зависимости от степени его загрязнения угольной пылью. С учетом вышеизложенного может быть определен срок службы балласта и разработаны мероприятия по техническому обслуживанию железнодорожного пути, позволяющие предотвратить появление отступлений геометрии рельсовой колеи III и IV степени.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, балластный слой, угольная пыль, остаточная деформация, трехосные испытания, щебеночный балласт, осадка пути, степень загрязнения.

Введение

В последние годы компанией ОАО «РЖД» проводится планомерная работа по повышению эффективности перевозок грузов за счет повышения веса и длины грузовых поездов. Увеличение осевых нагрузок является одним из приоритетных направлений, позволяющих обеспечить рост объемов перевозок [1]. Однако повышение

провозной и пропускной способности железнодорожных линий сказывается на состоянии железнодорожного пути из-за повышенного вибродинамического воздействия от подвижного состава. За прошедшие десять лет в системе путевого хозяйства были предприняты значительные меры по модернизации промежуточных рельсовых скреплений, конструкций шпал, лече-

нию земляного полотна, содержанию и ремонту искусственных сооружений, чего нельзя сказать про балластный слой из щебня [2]. Стабильность железнодорожного пути во многом зависит от состояния балластной призмы. С наработкой тоннажа в щебеночном балласте появляются как внутренние засорители и загрязнители, образующиеся за счет дробления и истирания частиц, так и внешние засорители и загрязнители, образующиеся за счет просыпания и проливания перевозимых грузов (например, угольной пыли, мазута, локомотивного песка и т. д.) [3, 4]. На железных дорогах Российской Федерации уголь является одним из основных видов перевозимых грузов [5, 6]. В связи с этим балластный слой железнодорожного пути зачастую оказывается загрязненным угольной пылью. Такое загрязнение оказывает негативное влияние на прочностные, деформационные и фильтрационные свойства щебеночного балласта, что, в свою очередь, приводит к появлению отступлений геометрии рельсовой колеи в виде просадок, а также перекосам рельсовых нитей по уровню, величина которых зависит от степени загрязнения. Согласно [7, 8], отступления геометрии рельсовой колеи I, II степени могут быть устранены в плановом порядке, например при капитальном ремонте или среднем ремонте пути [9], отступления III и IV степени должны устраняться незамедлительно. Таким образом, для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации железнодорожного пути необходимо своевременное обслуживание балласта.

С учетом вышесказанного представляет интерес исследование процесса накопления остаточных деформаций в балластной призме в зависимости от степени ее загрязнения угольной пылью с наработкой тоннажа для прогнозирования срока службы балласта и своевременного назначения видов ремонтно-путевых работ, которые позволят избежать неисправностей, угрожающих безопасности движения поездов.

Состояние вопроса

В настоящее время существует множество математических моделей для расчета остаточных деформаций в щебеночном балласте в зависимости от циклов приложения нагрузки. В работе [10] перечислены некоторые из них. Большинство моделей разработано на основе лабораторных испытаний в приборах трехосного сжатия, которые позволяют наиболее приближенно к полевым условиям моделировать напряженное состояние щебеночного балласта. Самой распространенной математической моделью для расчета остаточной деформации является модель, разработанная J. E. Alva-Hurtado [11]:

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 (1 + \mu \log_{10} N), \quad (1)$$

где ε_N — остаточная вертикальная деформация щебеночного балласта после N циклов нагружения, д. е. (%);

ε_1 — остаточная деформация после первого цикла нагружения, д. е. (%);

μ — безразмерный коэффициент, определяющий интенсивность (скорость) накопления остаточной деформации;

N — количество циклов нагружения.

Полученная J. E. Alva-Hurtado формула (1) достаточно проста для практического применения, однако она не учитывает осевые нагрузки от подвижного состава и физико-механические свойства щебеночного балласта, что может привести к неточностям при вычислении остаточных деформаций в балласте.

В работе [12] А. Ф. Колос разработал математическую модель расчета накопленных остаточных деформаций в щебеночном балласте. Модель учитывает:

- физико-механические свойства щебня;
- эксплуатационные нагрузки на балластный слой, передаваемые от движущегося поезда.

Данная модель позволяет с наибольшей точностью прогнозировать накопление остаточных

деформаций под подошвой шпалы. Расчетное соотношение представлено в формуле (2).

$$S_N = \frac{X \left(\ln \left(\left| C e^{h\lambda} - D \right| \right) - \ln \left(\left| D - C \right| \right) - h\lambda \right)}{Y} - \frac{ADF}{Y} + \frac{AF}{D\lambda e^{h\lambda}}, \quad (2)$$

где $A = E_{tan}^1 R_f (\sigma_{z-0})^2$;

$$B = (E_{ur}^1 - E_{tan}^1) q_f \sigma_{z-0};$$

$$C = E_{tan}^1 E_{ur}^1 q_f;$$

$$D = E_{tan}^1 E_{ur}^1 R_f \sigma_{z-0};$$

$$F = 1 + \mu \log_{10} \left(\frac{10^6}{P_{oc}} T \right);$$

$$X = (BD + AC) F;$$

$$Y = D^2 \lambda;$$

E_{tan}^1 — тангенциальный (начальный) модуль деформации щебня при первичном нагружении, МПа;

R_f — коэффициент, учитывающий соотношение между q_f и q_{ult} , д. е.;

σ_{z-0} — вертикальные напряжения, действующие под подошвой шпалы при движении подвижного состава, МПа;

λ — коэффициент затухания вертикальных напряжений в балласте, 1/м;

h — толщина балластного слоя под шпалой, м;

E_{ur}^1 — модуль упругости щебня при первичном нагружении, МПа;

q_f — предельное значение девиатора напряжений, МПа;

q_{ult} — асимптотическое значение девиатора напряжений, МПа;

μ — коэффициент, учитывающий интенсивность (скорость) накопления остаточных деформаций;

P_{oc} — нагрузка на ось подвижного состава, тс/ось;

T — тоннаж, млн т брутто пропущенного груза.

Исходные физико-механические свойства щебеночного балласта, такие как E_{tan} , E_{ur} и q_f , могут быть достаточно точно выявлены в ходе трехосных испытаний, значения данных параметров для щебеночного балласта различных фракций можно найти в [12]. Коэффициент μ , входящий в формулу (2), необходимо определять на основе многофакторных экспериментов, так как значения данного показателя зависят от зернового состава щебня, а также степени загрязнения и засорения щебеночного балласта. В связи с отсутствием в зарубежной и отечественной литературе данных о коэффициенте μ , в настоящей работе выполнены циклические трехосные испытания с чистым и загрязненным угольной пылью щебеночным балластом. В ходе испытаний установлены численные значения коэффициента μ , на основании которых произведены расчеты и определены остаточные деформации в балластном слое железнодорожного пути с наработкой тоннажа.

Материалы для исследования

Для проведения исследования был выбран гранитный щебень II категории по ГОСТ 7392—2014 [13], так как данная категория является наиболее распространенной на железных дорогах России, а также в соответствии с [14] может применяться на железнодорожных линиях особогрузонапряженной категории. Зерновой состав гранитного щебня, используемого в исследованиях, приведен на рис. 1, а его основные показатели сведены в табл. 1. В качестве загрязнителя использовалась угольная пыль с фракцией менее 0,1 мм 100 % по массе.

Таблица 1. Основные характеристики зернового состава гранитного щебня, используемого в данном испытании

Материал	Фракция, мм	C_u	d_{50} , мм	C_c
Гранитный щебень	25–60	1,63	42	0,94

Программа испытаний и применяемое оборудование

Исследование интенсивности накопления остаточных деформаций в щебеночном балласте было выполнено с помощью прибора трехосного сжатия ГТ 1.3.7 производства ООО «НПП Геотек» (рис. 2) в лаборатории «Геотехнического научно-исследовательского испытательного центра» при кафедре «Строительство дорог транспортного комплекса» ПГУПС. Данная установка допускает боковое расширение грунта и позво-

ляет в лабораторных условиях создавать такое напряженное состояние щебеночного балласта, которое характерно для конструкции балластной призмы в полевых условиях под действием поездной нагрузки.

Для проведения циклических трехосных испытаний были подготовлены образцы из чистого гранитного щебня (предварительно увлажненные до влажности менее 1 %) и образцы, загрязненные угольной пылью в количестве 6 %, 12% и 18 % по массе (рис. 3, 4). Образцы щебня, загрязнен-

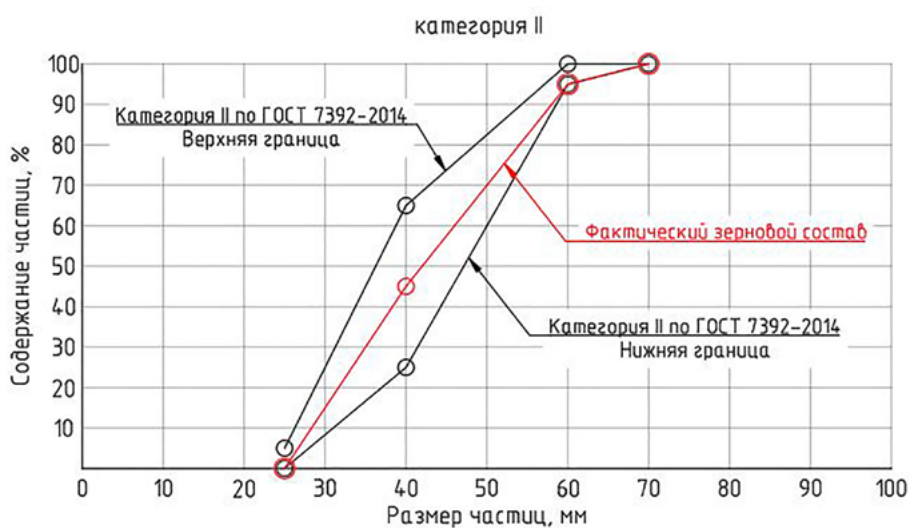


Рис. 1. Зерновой состав гранитного щебня, используемого в данном исследовании

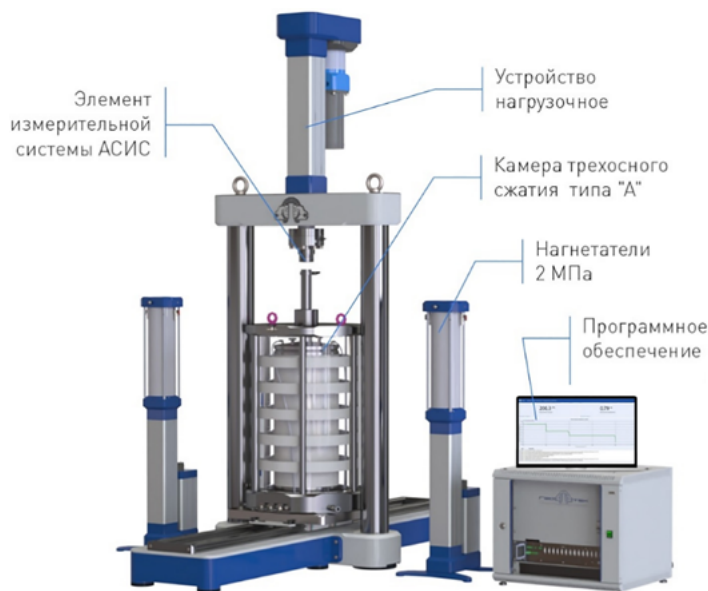


Рис. 2. Установка трехосного сжатия D300*600 ГТ 1.3.7 для испытаний крупнообломочных грунтов



Рис. 3. Сборка образца из чистого щебня



Рис. 4. Сборка образца из загрязненного щебня угольной пылью

ные угольной пылью, были доведены до влажности 6 %. Перед началом проведения испытаний образцы из чистого щебня были уплотнены в камере прибора трехосного сжатия до плотности $1,67 \text{ г/см}^3$, а образцы из загрязненного щебня до плотности $1,71\text{--}1,90 \text{ г/см}^3$.

Суть проведения испытаний заключалась в следующем. К образцам, уложенным в камеру трехосного сжатия, прикладывалось всестороннее давление $\sigma_3 = 20 \text{ кПа}$, моделирующее нагрузку от рельсошпальной решетки и собственного веса щебня. Далее к образцу прикладывалась дополнительная вертикальная нагрузка $q = \sigma_1 - \sigma_3$ (девиаторное напряжение), моделирующая воздействие подвижного состава. Согласно расчетам [15], напряжения в балласте под шпалой σ_6 от движущегося подвижного состава с нагрузками 27 т/ось при скорости $v = 90 \text{ км/ч}$ составляют 290 кПа .

С учетом вышеизложенного вертикальная нагрузка была принята равной $q = \sigma_1 - \sigma_3 = 290 \text{ кПа}$. После этого вертикальная нагрузка снижалась до значения 50 кПа и снова повторно прикладывалась (межпоездной интервал). Количество циклов приложения нагрузки составляло 30 раз для каждого образца, после чего испытание завершалось, поскольку по достижении 25–30-го цикла остаточные деформации составляли менее 2 % по сравнению с остаточными деформациями предыдущих циклов, что свидетельствовало о стабилизации образца. В ходе испытаний на каждом цикле фиксировались значения осевой деформации.

Обработка данных и результаты испытаний

Как отмечалось ранее, циклические трехосные испытания позволяют определять деформации, возникающие в образце после каждого цикла приложения нагрузки. Полная накопленная относительная вертикальная деформация образца ϵ_p при N -м количестве циклов нагружения будет определяться выражением:

$$\epsilon_p = \epsilon_p^1 + \epsilon_p^2 + \dots + \epsilon_p^N, \quad (3)$$

где ϵ_p^N — остаточная относительная деформация, возникающая на N -м цикле приложения нагрузки.

Преобразуем выражение (3) к виду:

$$\epsilon_p = \epsilon_p^1 \left(1 + \frac{\epsilon_p^2}{\epsilon_p^1} + \dots + \frac{\epsilon_p^N}{\epsilon_p^1} \right). \quad (4)$$

Выражение в скобках является функцией:

$$f(N) = \left(1 + \frac{\epsilon_p^2}{\epsilon_p^1} + \dots + \frac{\epsilon_p^N}{\epsilon_p^1} \right). \quad (5)$$

Согласно анализу, проведенному в работе [12], функцию $f(N)$ можно представить логарифмической зависимостью вида:

$$f(N) = (1 + \mu \log_{10} N). \quad (6)$$

Выражение (6) является линейной функцией вида $y = b + kx$. Отсюда следует, что $\log_{10} N$ — независимая переменная (где N — количество циклов приложения нагрузки), а коэффициент μ (характеризующий интенсивность накопления остаточных деформаций) является тангенсом угла наклона прямой линейной функции.

Значения коэффициента μ были получены в ходе регрессионного анализа, выполненного по данным циклических трехосных испытаний. Графики зависимости $f(N)$ от числа циклов приложения нагрузки для чистого и загрязненного щебня представлены на рис. 5, 6, а значения коэффициента μ приведены табл. 2.

Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что с увеличением процента загрязнения щебеночного балласта угольной пылью наблюдается рост значений коэффициента μ . Так, у щебеночного балласта с загрязнением угольной пылью в количестве 18 % по массе и влажностью 6 % коэффициент μ оказался в 1,5 раза выше, чем у чистого щебня. Это говорит о том, что процесс накопления остаточных деформаций в загрязненном балласте будет происходить как минимум в 1,5 раза интенсивнее.

На рис. 7 методом наименьших квадратов построена линейная регрессия, которая описывает зависимость коэффициента μ от процентного содержания по массе в щебеночном балласте загрязнителя (угольной пыли) m .

На основании полученных значений параметра μ произведен расчет накопленной осадки $S_{\text{ост}}$ в балластном слое в соответствии с формулой (2). Расчет выполнен с учетом наработки тоннажа 400 млн т брутто для четырехосного грузового полувагона с нагрузкой 27 т/ось, при толщине балластного слоя под шпалой 40 см. Параметры (R_f , λ и q_f), используемые при расчете, были приняты по данным [12]. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Данные из табл. 3 свидетельствуют о приросте остаточных деформаций в балласте с увеличением степени его загрязнения. Если у чистого щебня при наработке тоннажа 400 млн т брутто осадка составила 9 мм, то при его загрязнении угольной пылью 6 % по массе она увеличилась до 12 мм, при загрязнении 12 % по массе до 16 мм, а при загрязнении 18 % по массе до 26 мм. Это еще раз подтверждает влияние коэффициента μ на характер накопления остаточных деформаций в балластной призме при действии циклической нагрузки.

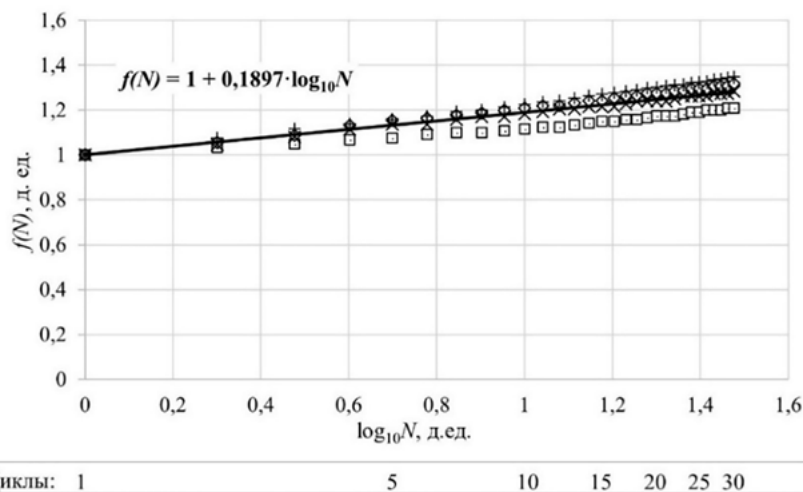


Рис. 5. Зависимость $f(N)$ от числа циклов приложения нагрузки для чистого щебня (на графике представлены серии испытаний)

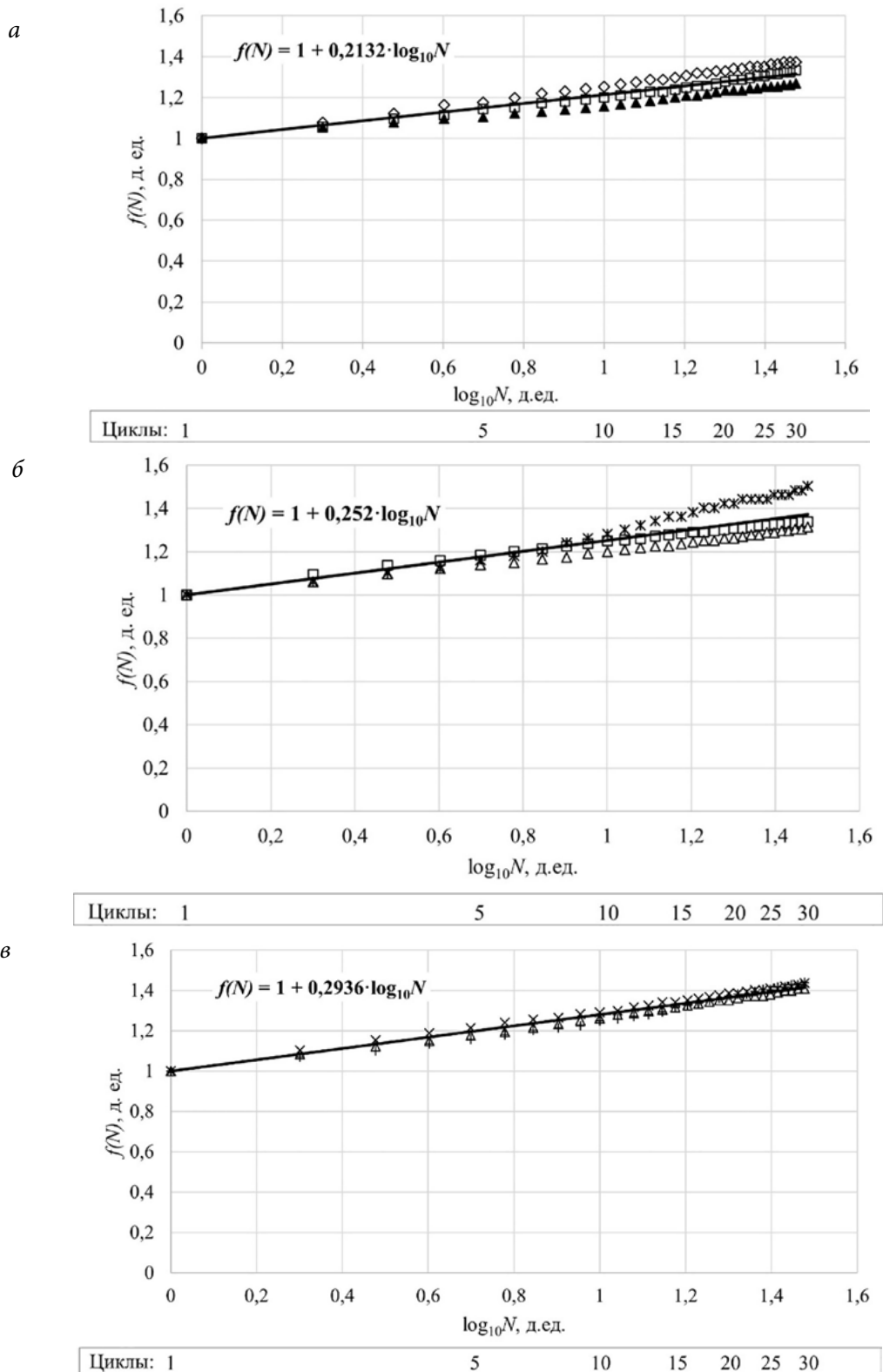


Рис. 6. Зависимость $f(N)$ от числа циклов приложения нагрузки для загрязненного щебня: *a* — при содержании угольной пыли 6 % по массе с влажностью 6 %; *б* — при содержании угольной пыли 12 % по массе с влажностью 6 %; *в* — при содержании угольной пыли 18 % по массе с влажностью 6 % (на графике представлены серии испытаний)

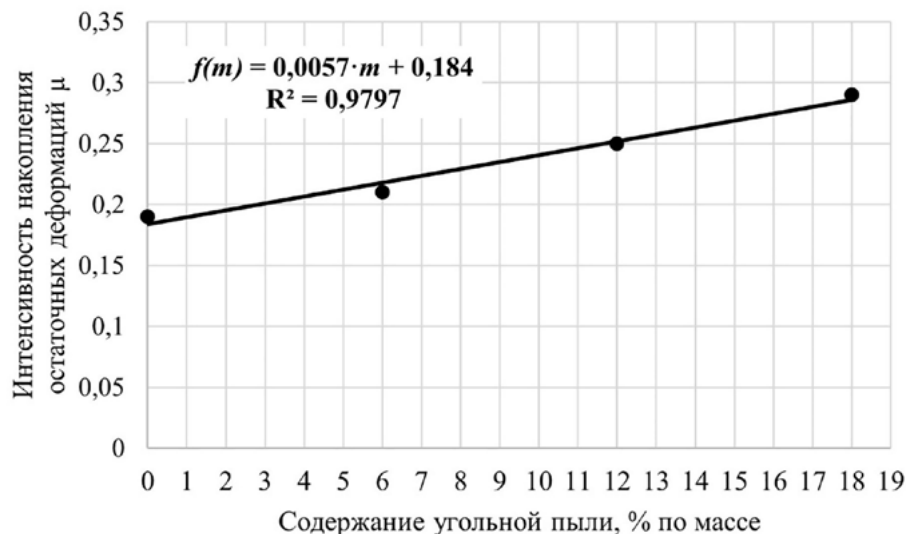


Рис. 7. Зависимость коэффициента μ от содержания угольной пыли в щебеночном балласте

Таблица 2. Значения коэффициента μ , определенные в результате исследования

Параметр	Чистый щебень (с влажностью до 1 %)	Загрязненный щебень (угольной пылью 6 % по массе) с влажностью 6 %	Загрязненный щебень (угольной пылью 12 % по массе) с влажностью 6 %	Загрязненный щебень (угольной пылью 18 % по массе) с влажностью 6 %
	Значение			
μ	0,19	0,21	0,25	0,29

Таблица 3. Результаты расчета накопленной осадки $S_{\text{ост}}$ в балластном слое при различных значениях коэффициента μ

Показатель	$\mu = 0,19$ (чистый щебень; w — до 1 %)	$\mu = 0,21$ (загрязненный щебень угольной пылью 6 % по массе; w — 6 %)	$\mu = 0,25$ (загрязненный щебень угольной пылью 12 % по массе; w — 6 %)	$\mu = 0,29$ (загрязненный щебень угольной пылью 18 % по массе; w — 6 %)
	Значение			
$S_{\text{ост}}$, мм	9	12	16	26

Где w — влажность образца щебеночного балласта.

Исходные данные для расчетов по формуле (2):

$E_{\text{тан}}^1 = 60$ МПа, $E_{\text{ур}}^1 = 419$ МПа принято по результатам текущего исследования (для чистого щебня);

$E_{\text{тан}}^1 = 46$ МПа, $E_{\text{ур}}^1 = 411$ МПа принято по результатам текущего исследования (при загрязнении углем 6 % по массе);

$E_{\text{тан}}^1 = 38$ МПа, $E_{\text{ур}}^1 = 382$ МПа принято по результатам текущего исследования (при загрязнении углем 12 % по массе);

$E_{\text{тан}}^1 = 26$ МПа, $E_{\text{ур}}^1 = 251$ МПа принято по результатам текущего исследования (при загрязнении углем 18 % по массе);

$R_f = 0,79$ д. е. (принято по данным [12]);

$\sigma_{z=0} = 0,29$ МПа (эквивалентно нагрузке 27 тс/ось при скорости движения подвижного состава 90 км/ч);

$\lambda = 1,21$ 1/м (принято по данным [12]);

$q_f = 330$ кПа (принято по данным [12]);

μ — принято по результатам текущего исследования;

$P_{\text{ос}} = 27$ тс/ось;

$h = 0,40$ м;

$T = 400$ млн т брутто

Заключение

В результате выполненных исследований были определены значения коэффициента μ , который учитывает темп развития осадков в бал-

ласте при наработке тоннажа, с учетом степени загрязнения щебня угольной пылью. Так, для чистого щебня значение коэффициента μ составляет 0,19, а для загрязненного щебня угольной

пылью в количестве 6 %, 12, 18 % по массе, с влажностью 6 % — 0,21, 0,25, 0,29 соответственно. Данный коэффициент применяется при расчетах остаточной деформации в балластной призме железнодорожного пути. Расчеты показали, что с увеличением загрязнения, которое сопровождается ростом коэффициента μ , осадка железнодорожного пути может происходить в 1,5–2,8 раза быстрее. На основе экспериментальных данных получена линейная зависимость коэффициента μ от содержания угольной пыли в щебеночном балласте.

Таким образом, можно заключить, что для поддержания надежной и стабильной работы железнодорожного пути необходимо осуществлять регулярный мониторинг состояния балластного слоя. Это позволит своевременно назначать необходимые мероприятия по техническому обслуживанию пути и предотвращать ускоренное накопление остаточных деформаций.

Список источников

1. Кузьмина Н. А. Исследование влияния движения поездов повышенной массы и длины как элемента увеличения эффективности перевозочного процесса / Н. А. Кузьмина // Евразийское научное объединение. — 2020. — № 1-1(59). — С. 45–50. — DOI: 10.5281/zenodo.3662107.
2. Горьканова Т. Н. Повышение стабильности щебеночного балласта / Т. Н. Горьканова // Путь и путевое хозяйство. — 2010. — № 2. — С. 22–24.
3. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути / С. Н. Попов. — М.: Транспорт, 1965. — 183 с.
4. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 558–575. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575.
5. Такайшвили Л. Н. Восточный полигон железных дорог России для экспорта российского угля: перспективы развития и ограничения / Л. Н. Такайшвили // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 12. — С. 41–55. — DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502.
6. Хусаинов Ф. И. Перевозки угля и нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: текущее состояние и перспективы / Ф. И. Хусаинов, М. В. Ожерельева // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2019. — № 4(83).
7. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов: утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 28 февраля 2020 г. № 436/р (в редакции от 9 ноября 2020 г. с изм. от 1 апреля 2021 г.).
8. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288/р. — М.: ОАО «РЖД», 2016. — 286 с.
9. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути: утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 17 ноября 2021 г. № 2888/р.
10. Abadi T. A Review and Evaluation of Ballast Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF) / T. Abadi, L. Le Pen, A. Zervos, W. Powrie // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 143. — Pp. 999–1006.
11. Alva-Hurtado J. E. Permanent Strain Behaviour of Railroad Ballast / J. E. Alva-Hurtado, E. T. Selig // Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — Stockholm: Balkema, 1981. — Vol. 1. — Pp. 543–546.
12. Колос А. Ф. Несущая способность и деформируемость балластного слоя при эксплуатации железнодорожного пути: дис. ... д-ра техн. наук / А. Ф. Колос. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. — 637 с.
13. ГОСТ 7392—2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.
14. СП 119.13330.2024. СНиП 32-01—95. Железные дороги колеи 1520 мм. — 2024.
15. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утверж-

дена Распоряжением ОАО «РЖД» № 2706/р от 22 декабря 2017 г. — М.: ОАО «РЖД». — 97 с.

Дата поступления: 04.11.2025

Решение о публикации: 29.11.2025

Контактная информация:

КАЧАЛКИН Андрей Вячеславович — аспирант;
andrew.kachalkin1999@mail.ru

КОЛОС Алексей Федорович — д-р техн. наук, проф. ;
kolos2004@inbox.ru

Determining the Degree of Residual Deformation Accumulation in the Ballast Prism of a Railway Track by Analysing the Intensity of Ballast Gravel Contamination with Coal Dust

A. V. Kachalkin, A. F. Kolos

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kachalkin A. V., Kolos A. F. Determining the Degree of Residual Deformation Accumulation in the Ballast Prism of a Railway Track by Analysing the Intensity of Ballast Gravel Contamination with Coal Dust // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 869–879. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-869-879

Summary

Purpose: To assess the rate of residual deformation accumulation in the ballast prism in relation to the degree of contamination by coal dust. **Methods:** The accumulation rate of residual deformations was quantified using the coefficient μ , derived from cyclic triaxial tests conducted within the GT 1.3.7 triaxial compression apparatus and subsequent regression analysis. **Results:** Laboratory tests and regression analysis have yielded values for the coefficient μ that indicated the intensity (rate) of residual deformation accumulation in the ballast prism. The investigations have been conducted on both clean stone ballast and ballast contaminated with coal dust at a moisture level of 6%. The findings demonstrate that as the percentage of coal dust contamination in the ballast increases, the rate of residual deformation accumulation intensifies by 1.5 times. With the values obtained for the coefficient μ , it was possible to calculate the ballast prism residual deformation. These calculations considered a tonnage of 400 million gross tons and were based on the premise that the bearing capacity of the formation is maintained, with track settlement occurring solely due to the deformations of the ballast prism. **Practical significance:** The results of the research allow for the forecasting of residual deformation accumulation in ballast stone as tonnage increases, particularly in relation to the level of contamination with coal dust. Consequently, this analysis enables the prediction of the ballast stone's service life and the formulation of strategies for the technical maintenance of the railway track aimed at preventing deviations in the geometry of track grades III and IV.

Keywords: Railway track, ballast layer, coal dust, residual deformation, triaxial tests, stone ballast, track settlement, contamination degree.

References

1. Kuz'mina N. A. Issledovanie vliyaniya dvizheniya poezdov povyshennoy massy i dliny kak elementa uvelicheniya effektivnosti perevozochnogo protsessa [Study of the impact of heavy-

haul and long-train operations as an element of increasing transportation efficiency]. *Evraziyskoe Nauchnoe Ob"edinenie* [Eurasian Scientific Association]. 2020, Iss. 1-1(59), pp. 45–50. DOI: 10.5281/zenodo.3662107. (In Russian)

2. Gor'kanova T. N. Povyshenie stabil'nosti shchebenochnogo ballasta [Improving the stability of crushed stone ballast]. *Put'i putevye khozyaystvo* [Track and Track Facilities]. 2010, Iss. 2, pp. 22–24. (In Russian)
3. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of railway track]. Moscow: Transport Publ., 1965, 183 p. (In Russian)
4. Kolos A. F. Zasorenie i zagryaznenie shchebenochnogo ballasta pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Contamination and pollution of crushed stone ballast during railway track operation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 558–575. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575. (In Russian)
5. Takayshvili L. N. Vostochnyy poligon zheleznykh dorog Rossii dlya eksporta rossiyskogo uglya: perspektivy razvitiya i ogranicheniya [Eastern polygon of Russian railways for Russian coal export: development prospects and constraints]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2023, vol. 334, Iss. 12, pp. 41–55. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502. (In Russian)
6. Khusainov F. I., Ozherel'eva M. V. Perevozki uglya i neftenalivnykh грузов zheleznodorozhnym transportom: tekushchee sostoyanie i perspektivy [Rail transportation of coal and oil cargo: current state and prospects]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics]. 2019, Iss. 4(83). (In Russian)
7. *Instruktsiya po otsenke sostoyaniya rel'sovoy kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov: utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 28 fevralya 2020 g. № 436/r (v redaktsii ot 9 noyabrya 2020 g. s izm. ot 1 aprelya 2021 g.)* [Instruction on assessing the condition of the rail track using track measuring devices and measures to ensure train traffic safety: approved by Order of JSC "RZD" No. 436/r dated February 28, 2020 (as amended on November 9, 2020, with changes from April 1, 2021)]. (In Russian)
8. *Instruktsiya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti: utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14 noyabrya 2016 g. № 2288/r* [Instruction on current maintenance of railway track: approved by Order of JSC "RZD" No. 2288/r dated November 14, 2016]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2016, 286 p. (In Russian)
9. *Pravila naznacheniya remontov zheleznodorozhnogo puti: utverzhdeny Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 17 noyabrya 2021 g. № 2888/r* [Rules for scheduling railway track repairs: approved by Order of JSC "RZD" No. 2888/r dated November 17, 2021]. (In Russian)
10. Abadi T., Le Pen L., Zervos A., Powrie W. A Review and Evaluation of Ballast Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF). *Procedia Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 999–1006.
11. Alva-Hurtado J. E., Selig E. T. Permanent Strain Behaviour of Railroad Ballast. *Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm: Balkema, 1981, vol. 1, pp. 543–546.
12. Kolos A. F. *Nesushchaya sposobnost' i deformiruemost' ballastnogo sloya pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Load-bearing capacity and deformability of ballast layer during railway track operation: Dr. Tech. Sci. diss.]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2024, 637 p. (In Russian)
13. *GOST 7392—2014. Shcheben' iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya* [Crushed stone from dense rocks for railway track ballast layer. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 32 p. (In Russian)
14. *SP 119.13330.2024. SNiP 32-01—95. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm* [Railways of 1520 mm gauge]. 2024. (In Russian)
15. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti: utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZhD" № 2706/r ot 22 dekabrya 2017 g.* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on track under reliability conditions: approved by Order of JSC "RZD" No. 2706/r dated December 22, 2017]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2017, 97 p. (In Russian)

Received: November 04, 2025

Accepted: November 29, 2025

Author's information:

Andrey V. KACHALKIN — Postgraduate Student;
andrew.kachalkin1999@mail.ru

Aleksey F. KOLOS — Dr. Sci. in Engineering, Professor;
kolos2004@inbox.ru