

Научная статья
УДК 625.122
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_24

Демпфирование сейсмического воздействия в модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях на примере железнодорожной насыпи

Юрий Сергеевич Меркурьев^{1✉}, Алексей Федорович Колос²

¹ «Ленгипрострой», Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

¹ merku50@mail.ru✉

² kolos@pgups.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема моделирования напряженно-деформированного состояния земляного полотна железной дороги с учетом сейсмического воздействия.

Целью работы является определение зависимости напряженно-деформированного состояния земляного полотна железной дороги от параметров демпфирования (свойств материала демпфирующего слоя, мощности этого слоя и его расположения в конструкции земляного полотна).

Использован принцип численного моделирования динамического воздействия методом конечных элементов. Моделирование производилось с применением акселерограммы, сгенерированной в программном комплексе Plaxis 2D. Рассмотрены отличительные особенности модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях, влияющие на полноценность моделирования сейсмического воздействия на земляное полотно.

Приведено описание принятых в исследовании ключевых параметров напряженно-деформированного состояния железнодорожной насыпи в ходе динамического воздействия. Среди них горизонтальные перемещения основной площадки земляного полотна, осадка по завершении землетрясения, напряжения в зоне формирования поверхности скольжения, удельная рассеянная энергия деформации в ходе сейсмического воздействия.

Произведены динамические расчеты напряженно-деформированного состояния железнодорожной насыпи при землетрясении с использованием модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях. Определено влияние динамических характеристик модального и гистерезисного демпфирования грунта насыпи и демпфирующего слоя на параметры напряженного-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути.

Определены оптимальные параметры демпфирования для максимального снижения горизонтальных перемещений, осадки после землетрясения, уменьшения колебаний напряжений в земляном полотне, поглощения удельной рассеянной энергии деформации в ходе землетрясения. Подбор оптимальных параметров осуществлялся на основе сравнения вариантов демпфирования, различающихся мощностью и положением демпфирующего слоя (слоев) в конструкции насыпи.

Ключевые слова: земляное полотно, сейсмическое воздействие, модальное демпфирование по Рэлею, гистерезисное демпфирование, модель упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях

Для цитирования: Меркурьев Ю. С., Колос А. Ф. Демпфирование сейсмического воздействия в модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях на примере железнодорожной насыпи // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 24–37. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_24.

Original article

Damping of seismic impact in the hardening soil small model in case of railway subgrade

Yury S. Merkuryev^{1✉}, Alexey F. Kolos²

¹ Lengiprostroy, Saint Petersburg, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

¹ merku50@mail.ru✉

² kolos@pgups.ru

Abstract. The problem of modeling the stress-strain state of a railway subgrade taking into account seismic impact is considered.

The aim of this study is to determine the dependence of the stress-strain state of a railway subgrade on damping parameters (the material properties of the damping layer, its thickness, and its location within the subgrade structure).

The principle of numerical modeling of dynamic action using the finite element method is used. Modeling was performed using a generated accelerogram in the Plaxis 2D software package. Distinctive features of a hardening soil model with small-strain stiffness, which affect the completeness of seismic impact modeling on the subgrade, are discussed.

A description of the key parameters of the stress-strain state of a railway embankment under dynamic action adopted in the study is provided. These include horizontal displacements of the top surface of subgrade, settlement after the earthquake, stresses in the slip surface formation zone, and the level of specific dissipated deformation energy during seismic action.

Dynamic calculations of the stress-strain state of a railway embankment during an earthquake were performed using a hardening soil model with small-strain stiffness. The influence of the dynamic characteristics of the modal and hysteresis damping of the embankment soil and damping layer on the stress-strain state parameters of the railway subgrade was determined.

Optimal damping parameters were determined to minimize horizontal displacements and settlement after an earthquake, reduce stress fluctuations in the subgrade, and absorb specific dissipated deformation energy during an earthquake. The selection of optimal parameters was carried out on the basis of a comparison of damping options that differ in the thickness and position of the damping layer (layers) in the embankment structure.

Keywords: subgrade, seismic impact, Rayleigh modal damping, hysteretic damping, hardening soil small model

For citation: Merkuryev Yu. S., Kolos A. F. Damping of seismic impact in the hardening soil small model in case of railway subgrade. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):24–37. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_24.

Введение

Основным фактором обеспечения безопасности движения поездов в сейсмически активных районах является поддержание стабильности земляного полотна, сооружаемого из грунтов различных свойств. В рамках данного исследования производится моделирование вынужденных колебаний земляного полотна железной дороги вследствие сейсмического воздействия. При этом грунту земляного полотна присваиваются различные динамические (демпфирующие) характеристики в целях определения влияния сейсмики на НДС земляного полотна.

Ранее [1] принципиально подтверждена возможность нейтрализации негативного воздействия сейсмики на НДС земляного полотна путем демпфирования конструкции на всю высоту насыпи или некоторого горизонтального слоя. Моделирование производилось в программном комплексе GEO5 МКЭ с использованием модели Мора – Кулона с заданием характеристик демпфирования через коэффициент относительного затухания ξ , определяемый параметрами Рэлея.

Во всех моделях грунтов, используемых в программном комплексе Plaxis, в соответствии с [2], в динамических расчетах возможно задание параметров Рэлея для моделирования эффекта модального демпфирования, что является искусственным влиянием на про-

цесс вычислений НДС в ходе численного расчета. Основное уравнение зависящего от времени перемещения объемного тела под воздействием динамической нагрузки, используемое для описания динамического поведения грунта и раскрывающее методику задания параметров Рэлея, рассмотрено в работе [3].

В настоящей работе исследуется поведение грунтового сооружения в виде земляного полотна с использованием модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях (hardening soil small – HSS). Этой моделью генерируется не только модальное, но и гистерезисное демпфирование. В статье [4] рассмотрены основные отличия модели HSS от других часто используемых моделей (линейно-упругой – LE, Мора – Кулона – МК и упрочняющегося грунта – HS) с точки зрения ее работы при циклическом воздействии и обоснован выбор именно модели HSS для исследования демпфирования сейсмического воздействия. В первой части настоящей статьи кратко проанализирован график зависимости осевой деформации от девиатора напряжений в модели HSS.

Результаты исследования, приведенные во второй части статьи, показывают, что использование в качестве грунта насыпи материала с повышенными демпфирующими характеристиками позволяет существенно снизить горизонтальные перемещения основной площадки зем-

ляного полотна (ОПЗП), осадку по завершению землетрясения, амплитуду напряжений в зоне формирования поверхности скольжения и снизить значение удельной рассеянной энергии (УРЭ) сейсмической волны, действующей на поперечное сечение насыпи. Результаты исследования также показывают, какие параметры грунта позволяют наиболее эффективно достигать искомого эффекта демпфирования.

В выводах определяются перспективные направления исследования в свете изученных вопросов моделирования НДС в ходе землетрясения.

Материалы и методы исследования

Приведем краткое описание поведения модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях в динамическом расчете.

Модель HSS (упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях) является производной от модели HS (упругопластической модели с упрочнением) и имеет отличительную особенность в виде нелинейного поведения при разгрузке и повторной нагрузке в ходе статического нагружения при больших сдвиговых деформациях $\gamma_{xy} > 10^{-3}$ (рис. 1). Также HSS, в отличие от модели HS, показывает гистерезисное поведение в ходе циклического нагружения при малых сдвиговых деформациях $\gamma_{xy} < 10^{-3}$ (рис. 2). И наконец, модель HSS описывает деградацию начального модуля сдвига G с ростом сдвиговой деформации γ (рис. 3).

На рис. 1 разгрузка (участок 3–4–5) и повторная нагрузка (участок 5–6–3) в ходе трехосного испытания характеризуются криволи-

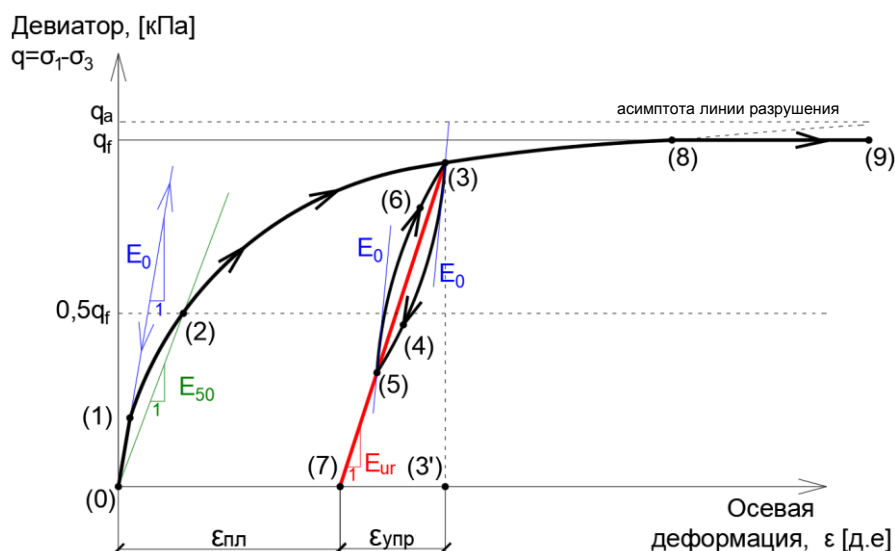


Рис. 1. Зависимость осевой деформации от девиатора напряжения в модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях в ходе трехосного испытания [4]

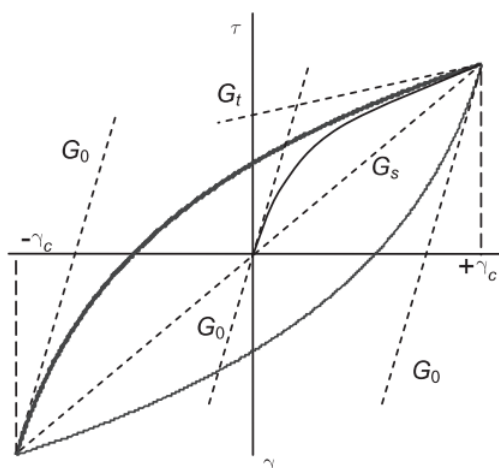


Рис. 2. Параметры жесткости в циклическом испытании на сдвиг [5]

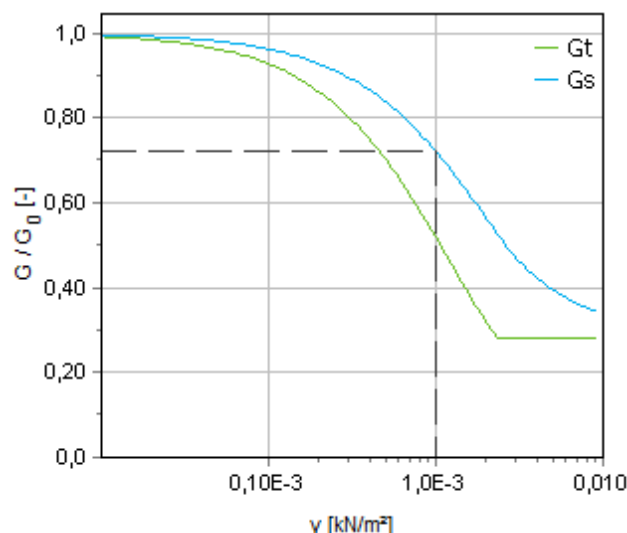


Рис. 3. Снижение нормализованного модуля сдвига G/G_0 в зависимости от значения сдвиговой деформации γ

нейной зависимостью, основным параметром которой является начальный модуль деформации E_0 , определяемый в соответствии с формулой

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu_{ur}), \quad (1)$$

где G_0 – начальный модуль сдвига или модуль сдвига при сверхмалых деформациях, МПа; ν_{ur} – коэффициент Пуассона при разгрузке, повторном нагружении, д. е.

На рис. 2 и 3 отражены три взаимосвязанных модуля сдвига – начальный G_0 , секущий G_s и касательный G_t , с помощью которых описывается гистерезисное поведение в модели HSS и деградация сдвиговой жесткости.

Все эти факторы имеют существенное значение при оценке НДС грунтового сооружения в ходе динамического нагружения, которым является землетрясение. За счет проявления гистерезисного поведения в ходе сейсмического воздействия модель HSS генерирует дополнительные пластические деформации на каждом этапе действия нагрузки (будь то приложение или снятие), что, соответственно, приводит к практически постоянно действующему демпфированию. Так, при землетрясении в ходе реализации множества малых деформаций по обширному поперечному сечению грунтовой насыпи происходит поглощение существенной части энергии сейсмического воздействия.

С одной стороны, привязанная к конкретному виду грунта степень поглощения колебаний, измеряемая коэффициентом демпфирования D , %, в соответствии с ГОСТ 56353 [6], определяется через соотношение удельной

рассеянной энергии ΔW и энергии упругих деформаций W , определяемых по графику циклических испытаний на сдвиг (рис. 4):

$$D = \Delta W / 4\pi W, \quad (2)$$

где W – энергия упругих деформаций, кДж/м³; ΔW – удельная рассеянная энергия – часть общей работы, совершенной над единицей объема грунта в ходе динамического нагружения и соответствующей изменению его внутренней энергии (п. 3.15 ГОСТ 56353–2022 [6]), кДж/м³.

С другой стороны, на конкретном инженерном сооружении, а именно насыпи земляного полотна железной дороги, степень поглощения колебаний можно оценить путем сравнения различных расчетных случаев по показателям НДС. Расчетные случаи варьируются в зависимости от динамических показателей грунта насыпи и демпфирующего слоя.

Модель HSS, в дополнение модели HS, имеет параметр начального модуля сдвига G_0 и параметр деформации $\gamma_{0,7}$, определяющие гистерезисное демпфирование. Площадь петли гистерезиса (см. рис. 4) зависит от соотношения G_0 с модулем разгрузки E_{ur} и от амплитуды прикладываемой нагрузки (т. е. интенсивности землетрясения), что и определяет масштаб поглощения колебаний.

В математических моделях [7] грунта есть и иной способ задания демпфирования – модальный. Так же как и более простые модели (LE, MK, HS), модель HSS обладает параметрами модального демпфирования – коэффициентами Рэлея α и β .

За критерии эффективности демпфирования земляного полотна, как и в работе [4], приняты перемещение ОПЗП и напряжение в зоне формирования поверхности скольжения. В дополнение к названным параметрам в настоящей работе для анализа взяты осадка ОПЗП по завершении землетрясения и УРЭ сейсмической волны за время действия землетрясения, измеряемая в центре масс поперечного сечения.

Перемещение ОПЗП является косвенным показателем вероятности схода поезда с рельсов [8]. Осадка ОПЗП – показатель деформативности земполотна. Напряжение в зоне поверхности скольжения показывает степень приближения напряженного состояния к критическому, т. е. к состоянию разрушения. А величина УРЭ

сейсмической волны за время действия землетрясения является обобщающим показателем, характеризующим объем энергии сейсмического воздействия, влияющей на НДС сооружения.

Точки измерения приведенных параметров приняты аналогично [4] и изображены на рис. 5.

Результаты исследования

Для расчетов принята конструкция насыпи высотой 15 м с бермами шириной 4 м и крутизной откосов 1:1.5 – 1:1.75 – 1:2. Мощность основания принята 30 м. Глубина и ширина основания были проанализированы ранее в [1] и приняты исходя из условий:

а) границы расчетной схемы не должны влиять на НДС рассматриваемого сооружения

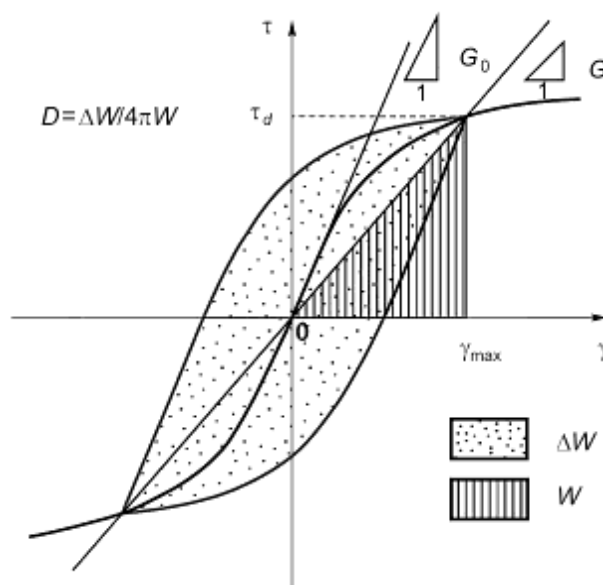


Рис. 4. График зависимости деформации сдвига от сдвигового напряжения в циклическом испытании на сдвиг

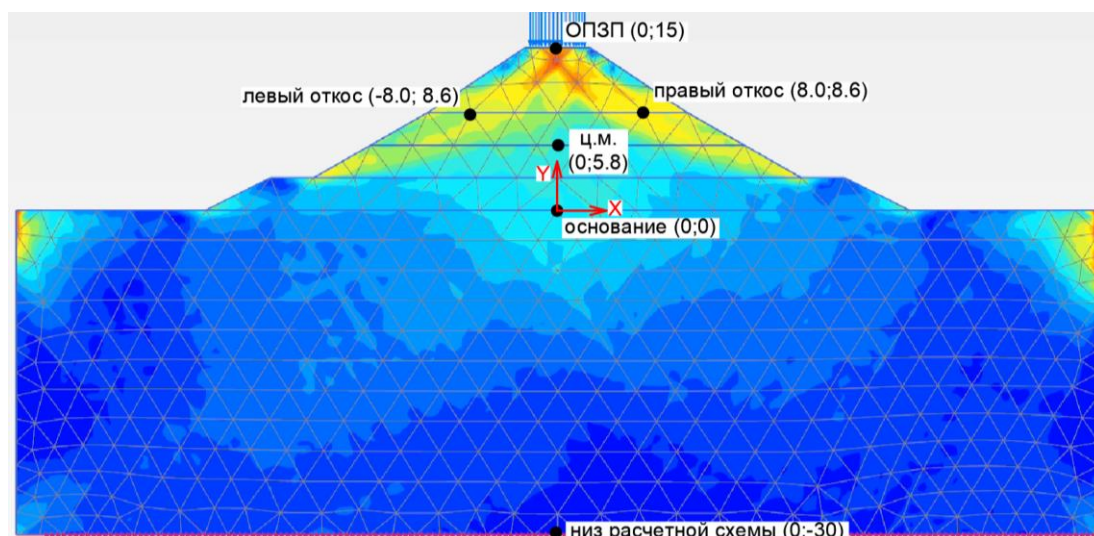


Рис. 5. Изоповрхности полной девиаторной деформации в насыпи и основании с изображением положения точек измерения

(как видно на рис. 5, области изменения напряжений на верхних углах основания не пересекаются с такими областями в сечении рассматриваемой насыпи);

б) размеры расчетной схемы позволяют проявиться предельным состояниям как самого сооружения, так и в области основания (п. 6.22 СП 358 [9]).

В качестве грунта основания и насыпи земляного полотна принят песок средней крупности, основные характеристики которого представлены в табл. 1. В исходной конструкции указанные характеристики присваиваются грунтам по всему поперечному сечению расчетной схемы.

Синтезированная акселерограмма (рис. 6) получена в программе GEO5 МКЭ с вводом ускорения в уровне основания. В соответствии с рекомендациями п. 5.2.2 СП 14 [10] для землетрясения интенсивностью 9 баллов принималось значение 4 м/с^2 .

Далее рассмотрим параметры НДС земляного полотна, по которым производится сравнение моделируемых вариантов конструкции. Среди них горизонтальные перемещения ОПЗП, осадка ОПЗП, главные напряжения в зоне формирования поверхности скольжения и удельная рассеянная энергия сейсмического воздействия.

Сейсмограммы, т. е. графики зависимости абсолютных перемещений элементов расчетной схемы (ОПЗП, основания, низа расчетной схемы) от времени по акселерограмме, для исходной недемпфированной конструкции при стандартных параметрах (см. табл. 1) приведены на рис. 7. Максимальное значение относительного перемещения (разность между абсолютным перемещением ОПЗП и абсолютным перемещением основания) составляет 75 мм. За критерий жесткости можно принять значение неисправности пути в плане согласно табл. 2.9 Инструкции по текущему содержанию пути [11]: в размере 50 мм для длины неровности до 40 м включительно при скорости до 60 км/ч. Рассчитываемое значение в сечении ОПЗП допустимо сравнивать со значением неровности в сечении уровня головки рельса в силу высокой жесткости балластной призмы и РШР.

Колебания конструкции насыпи в силу проявления свойств дилатансии грунта вызывают одновременное расползание и оседание насыпи. График вертикального смещения (осадки) ОПЗП и основания в процессе землетрясения отображен на рис. 8. Итоговая осадка недемпфированной насыпи на момент завершения землетрясения, рассчитанная как разница абсолютных осадок ОПЗП и основа-

Таблица 1

Исходные характеристики материала земляного полотна и основания

Показатель	Величина показателя
Удельный вес грунта γ , кН/м^3	18,0
Коэффициент Пуассона ν , д. е.	0,30
Модуль деформации $E_{\text{деф}}$, МПа	32,0
Секущий модуль деформации E_{50} , МПа	32,0
Угол внутреннего трения ϕ_{ef} , град	36,0
Удельное сцепление грунта c_{ef} , кПа	3,0
Угол дилатансии ψ , град	6,0
Модуль разгрузки E_{ur} , МПа	100,0
Модуль сдвига G , МПа	200,0
Деформации снижения модуля сдвига до значения $0,7G$ $\gamma_{0,7}$, д. е.	$0,1 \cdot 10^{-3}$

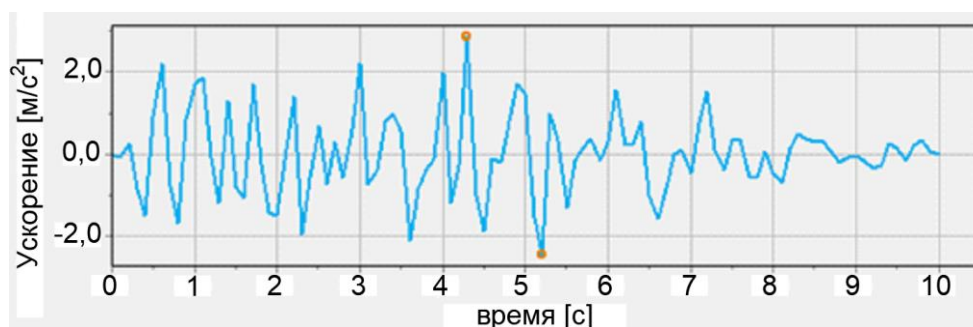


Рис. 6. Синтезированная акселерограмма землетрясения интенсивностью 9 баллов

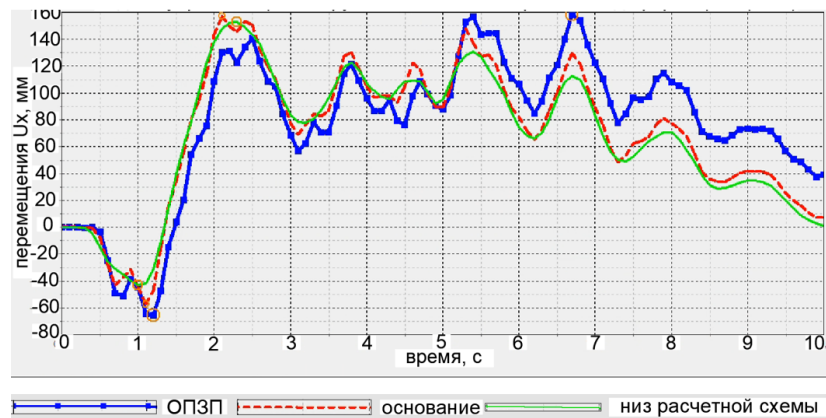


Рис. 7. Сейсмограммы ключевых точек расчетной схемы недемпфированного ж.-д. земполотна

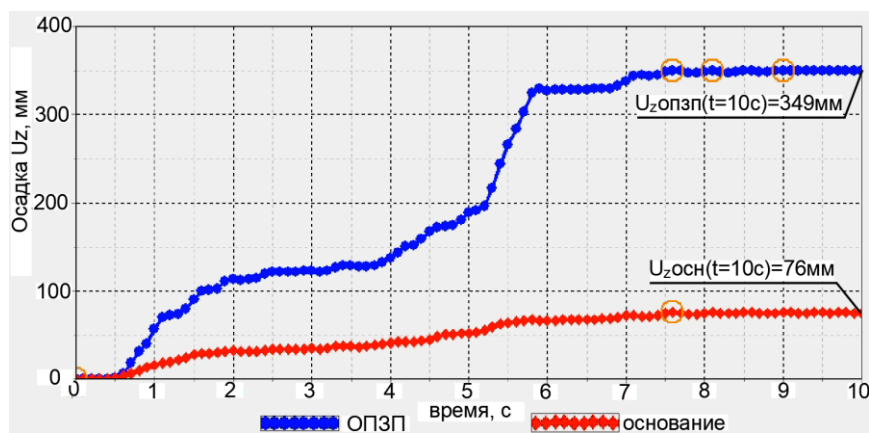


Рис. 8. Осадка основания и основной площадки недемпфированного ж.-д. земполотна



Рис. 9. Зависимость напряжений от времени по акселерограмме в точках формирования поверхности скольжения для недемпфированного ж.-д. земполотна

ния, составляет $346 - 76 = 273$ мм. В качестве критерия используется значение 100 мм для особо грузонапряженной линии по п. 6.2.4 СП 119 [12] несмотря на то, что в нормативе рассматривается осадка основания. Фактически заложенное в своде правил значение означает оседание всей насыпи, в том числе и основной площадки земполотна.

Для точек в зоне формирования поверхностей скольжения собраны данные по значениям полных главных напряжений. На рис. 9 приведены зависимости полных главных напряжений в правом и левом откосе насыпи от времени по акселерограмме. Поскольку сейсмическое воздействие является циклическим, то в откосах также циклически происхо-

дит изменение напряжений. Данное поведение практически симметрично относительно исходного напряжения. По завершении землетрясения напряжение возвращается в область исходных значений.

По представленному графику видно, что повышение до наивысшего значения в 105 кПа в момент времени $t = 5,5$ с происходит в течение долей секунды. В силу инерционности конструкции маловероятно, что такие скачки в конкретной точке могут привести к обрушению некоторого массива грунта по поверхности скольжения.

Для случая недемпфированной насыпи с параметрами, представленными в табл. 1, за время действия землетрясения значение УРЭ составило $\Delta W = 147$ Дж/м³. Данное значение определялось по площади внутри линии, которая огибает крайние точки графика зависимости деформации сдвига γ_{xy} от сдвигового напряжения τ_{xy} в точке центра масс поперечного сечения насыпи. Приведенный на рис. 10 график $\gamma_{xy} = f(\tau_{xy})$ принципиально схож по форме с приведенным в ГОСТ 56353–2022 [6]. Хаотичность траектории графика обуславливается:

- а) более сложной геометрией расчетной схемы земляного полотна, расположенного на толще основания, по сравнению с примитивной формой лабораторного образца;
- б) неравномерностью амплитуды деформации в центре масс насыпи вследствие действия беспорядочной сейсмической нагрузки, задаваемой по акселерограмме, по сравнению с циклическим равномерным возбуждением,

задаваемым в ходе стандартного лабораторного опыта.

В произведенном автором исследовании влияния демпфирования на устойчивость земляного полотна [3] определена зависимость коэффициента устойчивости от значений параметров Рэлея грунта насыпи в простейшей модели МК. Также определено оптимальное с точки зрения устойчивости положение демпфирующего слоя в конструкции насыпи по критерию экономии демпфируемого материала.

Во избежание повышения напряжений в откосах насыпи и, как следствие, повышения вероятности обрушения насыпи земляного полотна, а также для обеспечения безопасности движения через ограничение горизонтальных перемещений и осадки ОПЗП материалу задаются демпфирующие характеристики. Тем самым одновременно решаются две задачи – устойчивости и жесткости.

В табл. 2 и 3 представлены значения амплитуд относительных перемещений ОПЗП и основания, осадки ОПЗП по завершении землетрясения, максимальных напряжений в земполотне в точках формирования поверхности скольжения, а также значения УРЭ сейсмического воздействия в центре масс поперечного сечения в зависимости от параметров **модального** (см. табл. 2) и **гистерезисного** (см. табл. 3) **демпфирования**. Номеру расчетного геологического элемента (РГЭ) соответствует набор динамических характеристик грунта. Исходному состоянию (недемпфированное земполотно) присвоено обозначение РГЭ0.0.

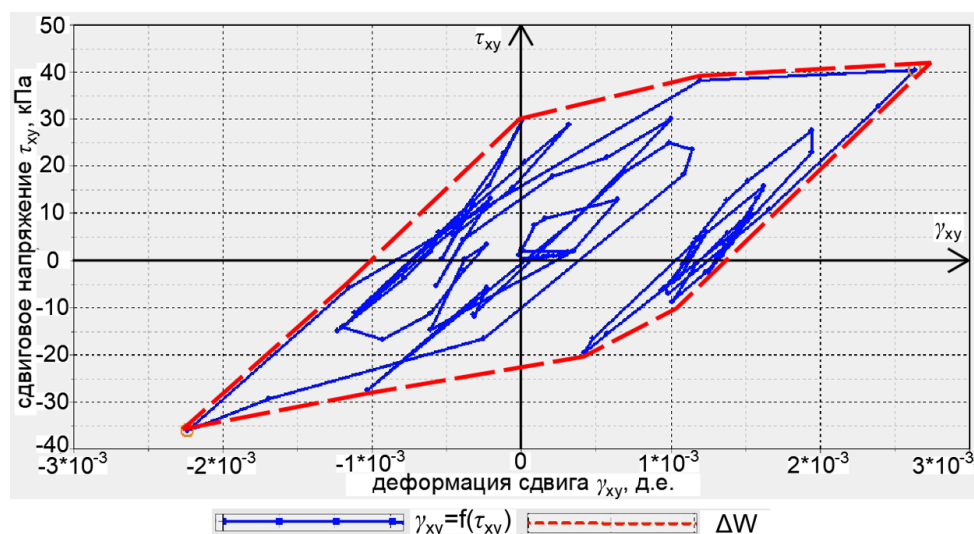


Рис. 10. График зависимости деформации сдвига от сдвигового напряжения в центре масс поперечного сечения в ходе сейсмического воздействия для недемпфированного ж.-д. земполотна

Таблица 2

Показатели НДС в конструкции земляного полотна в зависимости от параметров модального демпфирования при исходных параметрах гистерезисного демпфирования
 $G = 200$ МПа и $\gamma_{0,7} = 10^{-4}$

Показатель	Вариант демпфирования												
	0.0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Характеристики модаль-ного демпфирования:													
α, д. е.	0	0,05	0,2	0,4	1			0,01			0,05	0,2	0,4
β, д. е.	0	0,01			0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8	1		
Амплитуда перемещений в уровне ОПЗП U_x ОПЗП, мм	111	62	61	62	26	22	19	27	22	17	18	19	18
Амплитуда перемещений в уровне основания U_x осн, мм	72	73	72	71	69	71	70	72	74	73	75	74	72
Осадка ОПЗП по завершении землетрясения U_z ОПЗП, мм	273	83	81	80	44	29	19	41	30	12	17	16	16
Максимальное полное глав-ное напряжение σ ₁ , МПа	105	109	97	97	73	72	72	73	72	80	72	72	72
Удельная энергия сейсмиче-ской волны ΔW, Дж/м ³	147	49	35	39	0,81	0,21	0,07	0,77	0,02	0,02	0,08	0,08	0,07

Таблица 3

Показатели НДС в конструкции земляного полотна в зависимости от параметров гистерезисного демпфирования при нулевых характеристиках модального демпфирования $\alpha = \beta = 0$

Показатель	Вариант демпфирования								
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Характеристики гистерезисного демпфирования:									
G , МПа	100	50	100	50	200	100	200	50	200
$\gamma_{0,7}$, д. е.	10^{-4}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-5}
Амплитуда перемещений в уровне ОПЗП $U_{x \text{ ОПЗП}}$, мм	111	113	113	118	96	83	58	108	117
Амплитуда перемещений в уровне основания $U_{x \text{ осн}}$, мм	72	72	75	73	73	75	77	72	73
Осадка ОПЗП по завершении землетрясения $U_{z \text{ ОПЗП}}$, мм	273	286	283	286	197	170	90	267	286
Максимальное полное главное напряжение σ_1 , МПа	105	107	112	109	97	94	122	109	110
Удельная рассеянная энергия ΔW , Дж/м ³	147	146	130	128	99	82	26	124	131

Модификации модального демпфирования: РГЭ1, РГЭ2, РГЭ3...РГЭ15; гистерезисного: РГЭ0.0, РГЭ0.1, РГЭ0.2...РГЭ0.8. Строчки с данными амплитуд перемещений в уровне оснований $U_{x \text{ осн}}$ показывают, что вне зависимости от параметров демпфирования насыпи колебания в уровне ее основания сохраняются практически на одном уровне. Это подтверждает ожидаемую картину распределения перемещений, состоящую в неизменности деформированного состояния ниже неизменяемой части расчетной схемы – земляного полотна.

По данным табл. 2 можно сделать вывод, что на модальное демпфирование земполотна для принятых параметров геометрии насыпи и

характеристик грунтов основания в условиях землетрясения, заданного определенной акселерограммой, параметр Рэлея β оказывает наибольшее влияние. Максимальный эффект достигнут при $\beta = 0,8$ (РГЭ9). Значение параметра α практически не оказывает влияния на уменьшение перемещений или напряжений.

Анализ табл. 3 показывает, что максимальное демпфирование достигается при максимальных модуле сдвига G и пороговой деформации $\gamma_{0,7}$. При этом гистерезисное демпфирование не столь выражено в сравнении с модальным. Также с увеличением жесткости наблюдается рост максимальных напряжений в конструкции.

Для дальнейшего исследования и поиска оптимальных мощности и положения демпфирующего слоя используется РГЭ9.0 с основными динамическими параметрами: $\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$; $G = 100$ МПа; $\gamma_{0,7} = 10^{-4}$. Графики зависимости перемещений, напряжений и осадки ОПЗП от времени по акселерограмме для насыпи из грунта из РГЭ9.0 представлены на рис. 11–13. На сейсмограммах рис. 11 видно, как ОПЗП и основание демпфированного земполотна синхронно двигаются в течение всего землетрясения, что говорит о минимальных относительных перемещениях ОПЗП относительно основания. На рис. 12 отмечено, как снижается полное глав-

ное напряжение, но вместе с этим осадка ОПЗП (см. рис. 13) заметно меньше, чем у недемпфированной насыпи (см. рис. 8). На рис. 14 представлены графики зависимости деформации сдвига γ_{xy} от сдвигового напряжения τ_{xy} в центре масс поперечного сечения в ходе сейсмического воздействия для демпфированного железнодорожного земполотна из грунта РГЭ0.6 (см. рис. 14, а) и РГЭ9.2 (см. рис. 14, б).

По приведенным графикам (см. рис. 11–14) демпфированного земполотна и табл. 2 и 3 можно сделать следующие выводы относительно влияния демпфирования всей насыпи на критерии НДС (сравнивая РГЭ0 и РГЭ9):

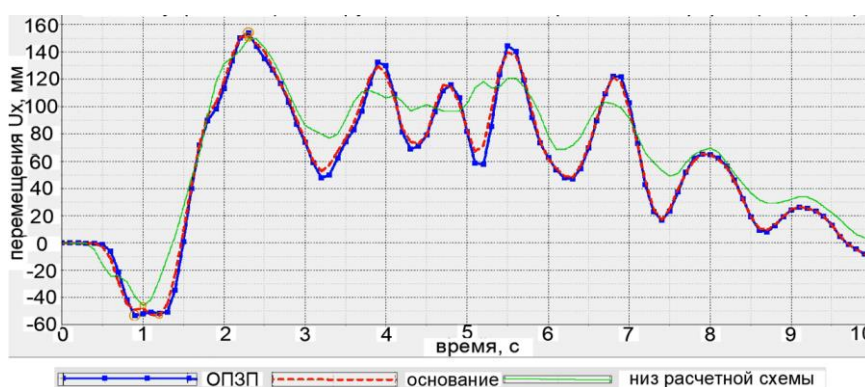


Рис. 11. Сейсмограммы элементов демпфированного ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$) земполотна

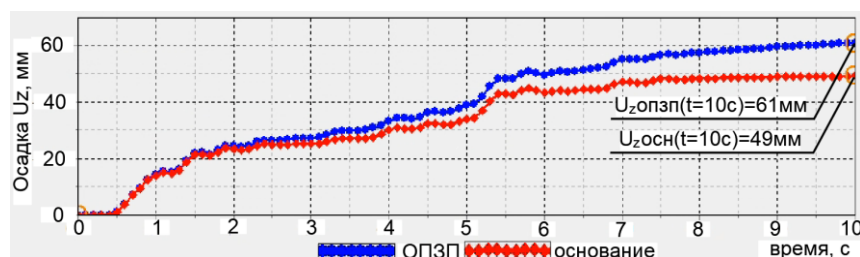


Рис. 12. Осадка элементов демпфированного ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$) земполотна

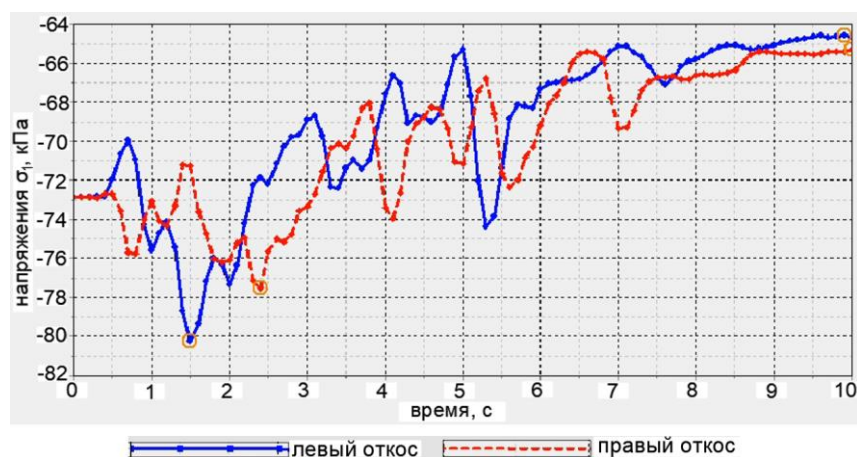


Рис. 13. Зависимости напряжений от времени по акселерограмме в приоткосных зонах в теле демпфированного ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$) земполотна

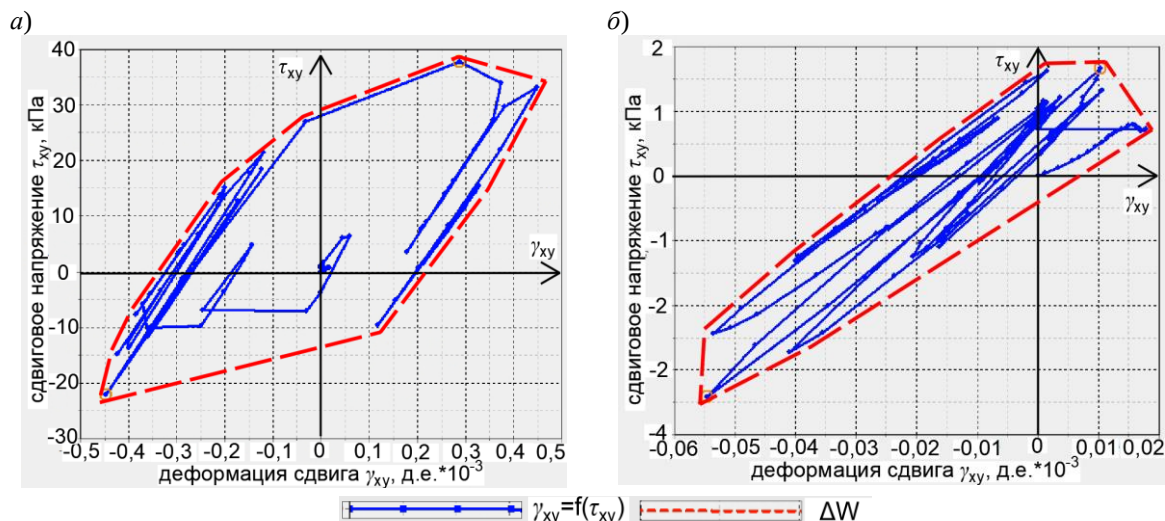


Рис. 14. График зависимости деформации сдвига от сдвигового напряжения в центре масс поперечного сечения в ходе сейсмического воздействия для демпфированного ж.-д. земполотна:
 а – РГЭ0.6 ($\alpha = \beta = 0$; $G = 200$ МПа; $\gamma_{0,7} = 10^{-3}$); б – РГЭ9.2 ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$; $G = 200$ МПа; $\gamma_{0,7} = 10^{-3}$)

1. Существенно уменьшилась величина перемещения ОПЗП относительно основания (со 111 до 17 мм, см. рис. 11), т. е. уменьшилась возможность схода поезда.

2. Осадка ОПЗП после завершения землетрясения (см. рис. 12) существенно снизилась – с 270 до 12 мм, т. е. также уменьшилась вероятность крушения за счет образования барьерного места на пути движения поезда.

3. Существенно уменьшилась амплитуда колебаний напряжений (см. рис. 13), т. е. уменьшилась вероятность образования зон разрушений в поперечном сечении насыпи или нарушения устойчивости. Также в демпфированном земполотне уменьшились и сами напряжения за время действия землетрясения. Это связано с перераспределением напряжений и поворотом площадок главных напряжений относительно исходного положения.

4. Удельная рассеянная энергия (см. рис. 14) с помощью модального демпфирования может быть полностью нейтрализована (все значения с высокими значениями β в табл. 3). Такой уровень нейтрализации может говорить о нереальности существования подобного материала. Больше чем на порядок уменьшились предельные значения сдвиговой деформации и сдвигового напряжения, составив соответственно $\gamma_{xy} < \pm 0,07 \cdot 10^{-3}$, $\tau_{xy} < \pm 4$ кПа (при этом в исходной конструкции $\gamma_{xy} < \pm 3 \cdot 10^{-3}$, $\tau_{xy} < \pm 40$ кПа).

Далее на основе сравнения вариантов конструкций с демпфирующим слоем (слоями) различной толщины и расположением в кон-

струкции определяются оптимальные параметры демпфирования.

Автором произведено исследование влияния демпфирования на устойчивость земляного полотна, в котором определена зависимость коэффициента устойчивости от различных значений параметров Рэлея грунта насыпи в модели Мора – Кулона [4]. Также определено оптимальное с точки зрения устойчивости положение демпфирующего слоя (ДС) в конструкции насыпи по критерию экономии демпфируемого материала. По аналогии с работой авторов [4] в настоящем исследовании рассматривается зависимость показателей НДС от мощности ДС и его расположения в конструкции (табл. 4). Расчеты произведены для различных случаев, с различным размещением слоя по высоте. За ординату ноль принята подошва насыпи или поверхность земли.

По показателю осадки за год для достижения нормативного значения (100 мм для пассажирской линии согласно п. 6.2.4 СП 119 [12]), а также величины неровности пути в плане (50 мм для скорости до 60 км/ч по распоряжению РЖД № 2288 [11]) подходят варианты демпфирования 10, 11, 12, 13 и 14. При этом наименьший объем демпфирующего материала с принятыми характеристиками требуется при варианте 14, в котором демпфирующий слой укладывается на отметках с 3 до 6 м и с 9 до 12 м от основания насыпи. При этом объем демпфирующего материала на 100 м пути при общем объеме насыпи в 47 400 м³

**Показатели НДС в конструкции земляного полотна в зависимости от параметров
модального демпфирования**

Показатель	Вариант демпфирования														
	0.0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Мощность ДС, м	0	3	3	3	3	3	6	6	6	6	9	9	9	9	6
Отметки размещения ДС (за ординату ноль принят уровень основания насыпи)	–	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	0–6	3–9	6–12	9–15	0–9	3–12	6–15	0–3, 6–9, 12–15	3–6, 9–12
Объем материала ДС, м ³ на 1 пог. м при полном сечении в 474 м ³	0	177	119	88	59	32	296	207	147	91	384	266	179	297	178
Амплитуда перемещений в уровне ОПЗП $U_{х, ОПЗП}$, мм	111	83	82	82	78	88	65	56	53	73	38	33	50	46	50
Осадка ОПЗП по завершении землетрясения $U_{z, ОПЗП}$, мм	273	195	163	98	59	93	118	69	33	49	48	22	26	30	35
Максимальное полное главное напряжение σ_1 , МПа	105	105	107	112	109	97	94	122	109	109	109	109	109	109	109
Удельная энергия сейсмической волны W , Дж/м ³	147	99	9,0	52	178	76	0,9	0,6	55	175	0,5	0,4	49	55	1,1

составляет 17 800 м³, мощность демпфирующих слоев равна 6 м.

Выводы

Для уменьшения негативного влияния сейсмического воздействия на земполотно железной дороги эффективным мероприятием является демпфирование грунта насыпи.

Численное моделирование НДС земполотна во время землетрясения показало, что в результате применения в качестве грунта насыпи материала с определенными динамическими параметрами (модального демпфирования по Рэлею – α и β ; гистерезисного демпфирования – модуль сдвига G и пороговая деформация $\gamma_{0,7}$) можно добиться существенного снижения горизонтальных перемещений и осадки в уровне ОПЗП, максимальных полных главных напряжений в зоне формирования поверхности скольжения. Тем самым уменьшается вероятность схода поезда с рельсов во время землетрясения и разрушения

насыпи по поверхности скольжения. Снижение осадки ОПЗП по завершении землетрясения позволяет говорить о повышении комфортности и безопасности движения. Уменьшение локальных осадок ОПЗП снижает динамические колебания движущегося поезда в вертикальной плоскости.

В соответствии с приведенными результатами расчетов при принятых параметрах расчетной схемы и характеристиках грунта основания и насыпи для достижения наибольшего модального демпфирования следует увеличивать параметр Рэлея β . Оптимальным из рассмотренных оказалось значение $\beta = 0,80$, при этом параметр α не оказывает существенного влияния на демпфирование.

Вместе с тем с помощью гистерезисного демпфирования с увеличением модуля сдвига G и пороговой деформации $\gamma_{0,7}$ достигается меньший уровень нейтрализации влияния сейсмике на параметры НДС.

Поиск оптимальных параметров демпфирования – задача для конкретных инженерно-геологических условий, категории железной дороги, геометрии насыпи и используемого для ее отсыпки материала. Параметры демпфирования следует подбирать по критерию экономии демпфирующего материала при достижении нормативных показателей НДС.

Перспективными направлениями исследований в свете рассмотренного материала являются:

1) методика расчета резонансной частоты грунтового сооружения для более точного определения характеристик демпфирования α и β ;

2) методика получения материала с повышенными демпфирующими свойствами – параметрами Рэлея α и β ;

3) факторы влияния на параметры гистерезисного демпфирования G и $\gamma_{0,7}$;

4) определение значений критических перемещений основной площадки земляного полотна при заданной скорости движения поезда;

5) исследование стабильности земляного полотна с иными геометрическими характеристиками и геологическими условиями основания.

Список источников

1. Меркурьев Ю. С. Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Динамический расчет по акселерограмме // Вестник УрГУПС. 2023. № 4. С. 110–119.
2. Пособие по моделям материалов. PLAXIS CONNECT Edition V20. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108423 (дата обращения: 01.11.2025).
3. Меркурьев Ю. С. Влияние демпфирования по Рэлею на устойчивость земляного полотна железной дороги в условиях сейсмического воздействия // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 104–113. DOI 10.20295/2223-9987-2024-03-104-113.
4. Меркурьев Ю. С., Колос А. Ф. Обоснование выбора модели грунта для исследования стабильности земляного полотна железной дороги при сейсмическом воздействии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 66–77. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_66.
5. Brinkgreve R. B. J., Kappert M. H., Bonnier P. G. Hysteretic damping in a small-strain stiffness model // Proc. NUMOG X. 2007. P. 737–742. URL: <https://www.researchgate.net/publication/267411874> (дата обращения: 02.11.2025).
6. ГОСТ Р 56353–2022. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 апреля 2022 г. № 210-ст // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183923> (дата обращения: 02.11.2025).
7. Мирный А. Ю., Мосина А. С. Математические модели грунтов для инженеров : монография. Москва : Геоинфо, 2024. 416 с.
8. Vibration of subgrade and evaluation of derailment coecient of train under combined earthquake moving train load / M. Gao, X. Xu, R. He [et al.] // Soils and Foundations. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.12.005> (дата обращения: 01.11.2025).
9. СП 358.1325800.2017. Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 декабря 2017 г. № 1720/пр : введены в действие с 27 июня 2018 г. Москва : Стандартинформ, 2018. 50 с.
10. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах : актуализированная редакция СНиП II-7-81* : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 мая 2018 г. № 309/пр : введены в действие с 25 ноября 2018 г. Москва : Стандартинформ, 2018. 116 с.
11. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО РЖД № 2288 : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288р. URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751> (дата обращения: 02.11.2025).
12. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП 32-01-95 (с Изменением № 1) : утверждены и введены в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 1 июля 2024 г. № 432/пр Москва : РСТ, 2024. 223 с.

References

1. Merkur'yev Yu. S. Modelling of seismic impact with a subgrade with a damping layer. dynamic calculations according to an accelerogram. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;(4):110–119. (In Russ.).
2. Manual on material models. PLAXIS CONNECT Edition V20. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108423.
3. Merkur'yev Yu. S. Rayleigh Damping influence on railway subgrade stability during seismic action. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2024. Iss. 3. P. 104–113. (In Russ.). DOI 10.20295/2223-9987-2024-03-104-113.
4. Merkur'yev Yu. S., Kolos A. F. Rationale for the choice of a soil model for studying the stability of railway subgrade under seismic impact. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):66–77. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_66.
5. Brinkgreve R. B. J., Kappert M. H., Bonnier P. G. Hysteretic damping in a small-strain stiffness model. *Proceedings. NUMOG X*. 2007. P. 737–742. URL: <https://www.researchgate.net/publication/267411874>.
6. GOST R 56353–2022. Soils. Methods for laboratory determination of the dynamic properties of dispersed soils. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 14.04.2022, No. 210-st. *Electronic Fund of Legal and Regulatory-Technical Documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183923>.
7. Mirny A. Yu., Mosina A. S. Mathematical Models of Soils for Engineers. Monograph. Moscow: Geoinfo Publishing House; 2024. 416 p. (In Russ.).
8. Gao M., Xu X., He R. [et al.]. Vibration of subgrade and evaluation of derailment coefficient of train under combined earthquake moving train load. *Soils and Foundations*. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.12.005>.
9. SP 358.1325800.2017. Hydraulic structures. Rules of design and construction in seismic-prone regions. Moscow: Standartinform; 2018. 50 p. (In Russ.).
10. SP14.13330.2018. Seismic building design code: Updated Version of SNiP II-7-81*. Moscow: Standartinform; 2018. 116 p. (In Russ.).
11. Order of Russian Railways No. 2288 14.11.2016 'Instructions for the Routine Maintenance of Railway Tracks'. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751>.
12. SP 119.13330.2024 Railway with 1520 mm gauge railways. SNiP 32-01-95 (with Amendment No. 1). Approved and put into effect by Order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 1.07.2024 No. 432/pr. Moscow: Rosstandart; 2024. 223 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю. С. Меркурьев – ведущий инженер-проектировщик отдела путей и сооружений АО «Ленгипрострой».
А. Ф. Колос – доктор технических наук, проректор по экономике и информатизации, доцент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

Yu. S. Merkur'yev – Leading Design Engineer of the Tracks and Structures Department, AO Lengiprostroy.
A. F. Kolos – Doctor of Engineering, Vice-Rector for Economics and Informatization, Associate Professor of the Road Construction of the Transport Complex Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025; одобрена после рецензирования 26.01.2026; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 05.11.2025; approved after reviewing 26.01.2026; accepted for publication 09.02.2026.