

УДК 625.122

Влияние демпфирования по Рэлею на устойчивость земляного полотна железной дороги в условиях сейсмического воздействия

Ю. С. Меркурьев

АО «Ленгипрострой», Россия, 190005, Санкт-Петербург, 10-я Красноармейская ул., 3б, Литера А, помещ. 6-Н

Для цитирования: 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

Аннотация

Цель: рассмотреть проблему устойчивости насыпи земляного полотна железной дороги в условиях сейсмического воздействия, показать необходимость повышения устойчивости при землетрясении, определить возможность повышения сейсмоустойчивости за счет ввода в конструкцию демпфирующего слоя, определить оптимальные параметры демпфирования с учетом рационального использования материалов земляного полотна. **Методы:** расчеты устойчивости насыпи производятся по методу Г. М. Шахунянца. Учет землетрясения осуществляется через увеличение сдвигающих сил, действующих на отсеки сползающего массива. Максимальные ускорения отсеков определяются по результатам динамического расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния насыпи в ходе действия землетрясения, которое задается через акселерограмму. **Результаты:** показана эффективность применения в конструкции насыпи демпфирующего слоя, вводимого с целью повышения сейсмоустойчивости. Определена зависимость коэффициента устойчивости насыпи от параметров Рэлея материала, слагающего тело всей насыпи. Для наилучших параметров материала определены оптимальные мощность и положение демпфирующего слоя в конструкции, при которых коэффициент устойчивости принимает нормативное значение, а объем демпфирующего слоя минимальный. **Практическая значимость:** в качестве альтернативы нормативному подходу приведена возможность повышения устойчивости насыпи железной дороги в условиях землетрясения путем введения в конструкцию демпфирующего слоя. Определен алгоритм выбора оптимальных параметров демпфирования в целях повышения сейсмоустойчивости.

Ключевые слова: земляное полотно, сейсмическое воздействие, метод конечных элементов, устойчивость, демпфирование по Рэлею, демпфирующий слой

Введение

Основным фактором обеспечения надежности железнодорожного пути в районах проявления землетрясений является обеспечение сейсмоустойчивости земляного полотна, сооружаемого из грунтов различных свойств.

Оценку общей устойчивости земляного полотна по СП 32-104-98 [1] рекомендуется осуществлять по первому предельному состоянию — несущей способности (по условиям предельного равновесия). Устойчивость однородных массивов грунтов проверяется по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения (КЦПС) с нахождением наиболее опасной призмы обрушения, характеризуемой

минимальным коэффициентом устойчивости. Последний представляет собой соотношение сил сопротивления и сдвигающих откос сил. Учет землетрясения при этом производится в форме псевдостатического анализа. Суть данного метода заключается в добавлении в перечень нагрузок дополнительной сейсмической силы, равной произведению коэффициента сейсмичности на соответствующий вес отсека. Величина коэффициента сейсмичности принимается строго равной определенному значению для всего поперечного сечения земляного полотна.

Альтернативой нормативному подходу является проведение динамического анализа, который позволяет учитывать продолжительность землетрясения, геометрию насыпи и динамические характеристики грунта насыпи. В ходе динамического анализа возможно определить ускорение отдельных точек поперечного сечения земляного полотна. Полученные характеристики используются при расчете устойчивости откоса.

В работе [2] автором с помощью динамического анализа в программе GEO5 МКЭ была проведена оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов земляного полотна во время землетрясения. Установлена возможность снижения напряжений и уменьшения деформаций с помощью устройства демпфирующего слоя.

В рамках данного исследования производится моделирование землетрясения на земляное полотно железной дороги в программном комплексе Plaxis. В ходе динамического расчета НДС определяются максимальные ускорения основной площадки и основания насыпи железной дороги. При этом грунту земляного полотна присваиваются различные демпфирующие (динамические) характеристики в целях снижения негативного влияния сейсмичности.

На основе полученных максимальных ускорений вычисляется сейсмический коэффициент для каждого отсека поперечного сечения насыпи. Для зафиксированной поверхности скольжения выявляется зависимость коэффициента устойчивости от характеристик демпфирования. Далее для выбранного материала определяются оптимальные мощность и положение демпфирующего слоя в конструкции земляного полотна для достижения целевого коэффициента устойчивости.

В заключении настоящей работы приводятся выводы относительно возможности снижения негативного влияния сейсмического воздействия на устойчивость земляного полотна. Составлен алгоритм определения оптимальных параметров демпфирования насыпи железной дороги в условиях действия землетрясения.

Устойчивость земляного полотна в условиях сейсмического воздействия

Устойчивость оценивается методом КЦПС, разработанным Г. М. Шахуняцем. Нагрузка от подвижного состава задается путем ввода в расчетную схему фиктивного столбика грунта. Для расчетов принята конструкция насыпи высотой 15 м

с бермами шириной 4 м и крутизной откосов 1:1,5–1:1,75–1:2. В качестве грунта основания и насыпи земляного полотна принят песок со следующими физико-механическими характеристиками:

- удельный вес грунта $\gamma = 18,0$ кН/м³;
- угол внутреннего трения $\varphi = 25^\circ$;
- удельное сцепление грунта $c = 2,0$ кПа.

Взвешивающее действие воды в расчетах не учитывается.

В программе GEO5 «Устойчивость откоса» в ходе расчетов коэффициента устойчивости по методу Шахунянца для принятых исходных данных получена критическая КЦПС с конкретными координатами центра и радиусом. Данная поверхность получена из множества поверхностей скольжений и выбрана методом оптимизации, то есть перебором по определенному алгоритму программного комплекса. Для дальнейших расчетов зафиксированы полученное положение центра и радиус КЦПС. Эти данные использовались для осуществления полуручного счета с помощью графического построения отсековой модели в AutoCAD и последующего расчета коэффициента устойчивости в Excel.

В настоящей работе учет сейсмического воздействия в расчете устойчивости осуществляется по методу Шахунянца через увеличение сдвигающей силы на сейсмический коэффициент [3, 4]:

$$K_c = 1 + \alpha_{\max} / g, \quad (1)$$

где α_{\max} — расчетная величина сейсмического ускорения, м/с²;

g — ускорение свободного падения, 9,8 м/с².

В данном выражении (1) участвует характеристика ускорения, которую можно определять в ходе динамического расчета НДС методом конечных элементов.

В программе PLAXIS 2D по сгенерированной акселерограмме определялось максимальное горизонтальное ускорение на абсолютной отметке +15,00 в зоне основной площадки земляного полотна (ОПЗП) в течение 10-секундного сейсмического воздействия. Далее для этого значения ускорения в зоне ОПЗП определялось ускорение в зоне основания насыпи на отметке 0,00. Для получения по формуле (1) сейсмического коэффициента каждого отсека (рис. 1) методом интерполяции в зависимости от положения центра масс определялось свое максимальное ускорение. Ускорения отсеков фиктивного столбика принимались равными ускорению в зоне ОПЗП.

Синтезированная акселерограмма получена в программе GEO5 МКЭ. Для землетрясения интенсивностью 9 баллов в соответствии с рекомендациями п. 5.2.2 СП14 [5] принималось значение ускорения 4 м/с² в уровне низа расчетной схемы (на отметке –30,00).

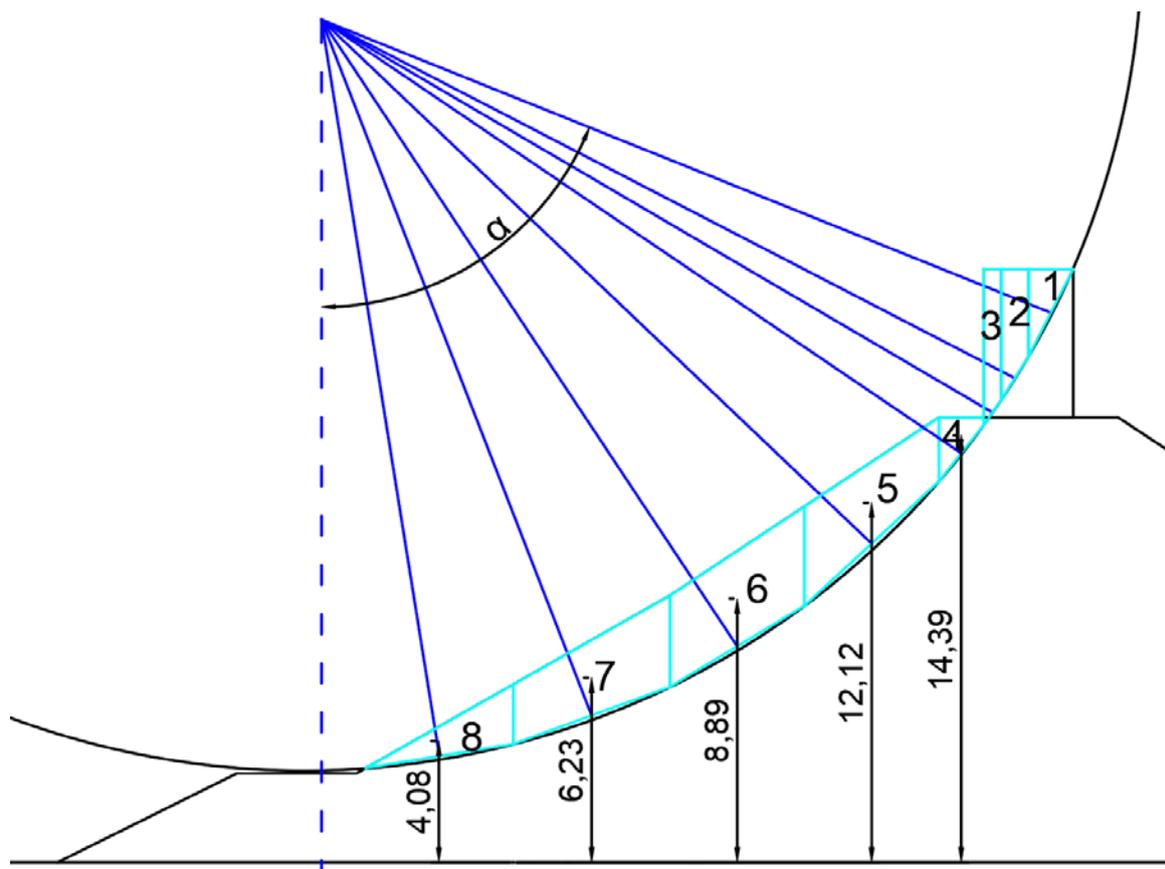


Рис. 1. Расчетная схема отсековой модели для расчета коэффициента устойчивости методом Г.М. Шахунянца

Значение коэффициента устойчивости $K_{уст}$ определялось как соотношение удерживающих $F_{уд}$ и сдвигающих $F_{сдв}$ сил

$$K_{уст} = \sum F_{уд} / F_{сдв}. \quad (2)$$

Результаты расчета коэффициента устойчивости с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов для исходной конструкции насыпи сведены в табл. 1.

Коэффициент устойчивости исходной конструкции насыпи принимает значение $K_{уст} = (61,00 + 36,09) / 85,06 = 1,14$.

Изменение параметров Рэлея материала грунта насыпи

Ключевой характеристикой системы в ходе численного моделирования динамической задачи взаимодействия основания и сооружения методом конечных элементов является демпфирование, то есть способность поглощать колебания.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета коэффициента устойчивости с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов для исходной конструкции насыпи

№ отсека	Угол α , град	Площадь отсека S , м ²	Вес отсека Q , кН	Нормальная сила $N_i = Q \cdot \cos \alpha$, кН	Касательная сила (с учетом землетрясения) $T_{сейс} = Q_i \cdot \sin \alpha \cdot K_c$, кН	Ордината центра масс отсека $Z_{ц.м.}$, м	Максимальное ускорение в точке ц. м. a_{max} , м/с ²	Сейсмический коэффициент K_c	Длина подошвы отсека l_p , м	Сила сцепления $C_i \cdot l_p$, кН	Сила трения $N_i \cdot f_p$, кН
1	68	2,21	3,98	1,49	5,92	15,00	5,92	1,60	3,31	6,62	0,69
2	63	3,35	6,03	2,74	8,62	15,00	5,92	1,60	1,72	3,44	1,28
3	59	2,85	5,13	2,64	7,05	15,00	5,92	1,60	1,03	2,06	1,23
4	56	1,82	3,28	1,83	4,32	14,39	5,78	1,59	2,42	4,84	0,85
5	46	12,40	22,32	15,50	24,63	12,12	5,23	1,53	6,15	12,30	7,23
6	33	14,48	26,06	21,86	20,65	8,89	4,46	1,45	5,27	10,54	10,19
7	21	13,38	24,08	22,48	12,00	6,23	3,82	1,39	5,59	11,18	10,48
8	9	4,98	8,96	8,85	1,88	4,08	3,31	1,34	5,01	10,02	4,13
СДВ					85,06	УД				61,00	36,09

Для пояснения моделирования этого процесса следует рассмотреть основное уравнение [6] перемещения объемного тела под воздействием динамической нагрузки, которое имеет следующий вид

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F. \quad (3)$$

Здесь M , C и K — матрицы масс, демпфирования и жесткости; F — вектор нагрузки; \ddot{u} , \dot{u} и u — векторы ускорения, скорости и перемещения.

Уравнение матрицы демпфирования C для конечных элементов представлено функцией матриц массы и жесткости

$$C = \alpha_R M + \beta_R K. \quad (4)$$

Это уравнение задает пределы для определения матрицы демпфирования в виде коэффициентов Рэлея α_R и β_R . Если $\alpha_R > \beta_R$, демпфируются низкочастотные колебания, а если $\alpha_R < \beta_R$ — высокочастотные.

Рэлеевское демпфирование можно рассматривать как уловку для добавления вязкого демпфирования, поскольку оно вносит вклад в член скорости в динамическом уравнении, беря часть массы (αM) и часть жесткости (βK) [7].

В результате комбинирования параметров Рэлея грунта, слагающего все поперечное сечение насыпи (отметки от 0,00 до +15,00), достигнуто повышение коэффициента устойчивости насыпи. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета коэффициента устойчивости насыпи с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов в зависимости параметров Рэлея грунта насыпи

Характеристики демпфирования по Рэлею		α	0	0,05	0,2	0,4	1			0,01			0,05	0,2	0,4
		β	0	0,01			0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8	1		
$\sigma_{\text{нап}}^2$ М/С ²	ОПЗП		5,921	4,028	3,967	3,887	2,393	2,296	2,249	2,659	2,550	2,496	2,472	2,434	2,372
	основание		2,331	1,706	1,690	1,677	1,323	1,721	1,761	1,735	1,800	1,846	1,853	1,840	1,823
Коэффициент сейсмичности	Кс (Z = 15,00)		1,604	1,411	1,405	1,397	1,244	1,234	1,229	1,271	1,260	1,255	1,252	1,248	1,242
	Кс (Z = 14,39)		1,589	1,401	1,395	1,387	1,240	1,232	1,227	1,267	1,257	1,252	1,250	1,246	1,240
	Кс (Z = 12,12)		1,534	1,365	1,360	1,353	1,223	1,223	1,220	1,253	1,246	1,242	1,240	1,237	1,231
	Кс (Z = 8,89)		1,455	1,314	1,310	1,305	1,200	1,210	1,209	1,233	1,229	1,228	1,226	1,224	1,219
	Кс (Z = 6,23)		1,390	1,272	1,269	1,265	1,180	1,200	1,200	1,216	1,215	1,216	1,215	1,213	1,209
	Кс (Z = 4,08)		1,337	1,239	1,236	1,232	1,165	1,192	1,193	1,203	1,204	1,206	1,206	1,204	1,201
	Кс (Z = 0,00)		1,238	1,174	1,172	1,171	1,135	1,176	1,180	1,177	1,184	1,188	1,189	1,188	1,186
Коэффициент устойчивости $K_{\text{уст}}$			1,141	1,276	1,281	1,287	1,415	1,411	1,414	1,380	1,387	1,390	1,392	1,396	1,401

По данным табл. 2 видно, что коэффициент устойчивости принимает максимальное значение 1,415 при параметрах Рэлея грунта насыпи $\alpha = 1,00$ и $\beta = 0,20$. Грунт с данными свойствами принимается в качестве наилучшего для повышения сейсмостойкости.

Демпфирующий слой

Поскольку сейсмические волны подчиняются всем законам волнового движения [8–11], то на границах сред, то есть слоев с разными сейсмическими (динамическими) характеристиками, они преломляются, отражаются, а также затухают при удалении от источника. В связи с этим очевидно, что положение и мощность слоя демпфирования оказывают существенное влияние на НДС грунтового сооружения во время землетрясения. Чем больше толщина слоя, тем выше демпфирование. Также важно и положение относительно низа расчетной схемы (фактического источника сейсмического воздействия).

В целях экономии материалов производится оптимизация конструкции путем сокращения мощности демпфирующего слоя (ДС) и определения его положения в конструкции по высоте относительно ОПЗП и основания. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета коэффициента устойчивости в зависимости от мощности и положения демпфирующего слоя

№ расчета	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Мощность ДС, м	0	3	3	3	3	3	6	6	6	6	9	9	9	6	6	9	
Отметки границ ДС, м	верх	0	3	6	9	12	15	6	9	12	15	9	12	15	0–3, 6–9	3–6, 9–12	0–3, 6–9, 12–15
	низ	0	0	3	6	9	12	0	3	6	9	0	3	6			
Макс. ускорение, м/с ²	ОПЗП	5,92	4,46	5,47	4,35	4,01	3,58	5,07	3,96	3,13	3,40	2,79	3,29	3,23	4,10	3,80	3,04
	основание	2,33	1,77	2,10	1,60	1,87	2,02	1,72	1,86	1,78	1,88	1,66	2,11	1,71	1,68	1,66	1,65
$K_{уст}$	1,14	1,24	1,17	1,26	1,27	1,30	1,21	1,28	1,34	1,32	1,37	1,32	1,34	1,27	1,29	1,35	
Объем в 1 пог. м, м ³	0	177	119	88	59	32	296	207	147	91	384	266	179	265	178	297	

По полученным данным определяются оптимальные параметры демпфирования, то есть достижение необходимого коэффициента устойчивости с использованием наименьшего объема демпфирующего материала. Если за ориентир взять, например, значение $[K_{уст}] = 1,28$, то оптимальным мероприятием для повышения сейсмостойчивости будет ввод демпфирующего слоя с характеристиками параметров Рэлея $\alpha = 1,00$ и $\beta = 0,20$ на отметках с +12,00 до +15,00, что потребует на 1 пог. м 32 м³ материала с достижением $K_{уст} = 1,30$.

Выводы

Закрепленный в нормативной документации метод учета землетрясения псевдостатическим анализом не позволяет учитывать динамические характеристики грунта в расчете устойчивости.

Альтернативой нормативному подходу в расчете устойчивости насыпи земляного полотна является динамический анализ, позволяющий вводить в расчетную схему элементы демпфирования, которые, в свою очередь, повышают сейсмостойчивость насыпи.

На основе динамического анализа подбираются такие характеристики демпфирования, как параметры Рэлея грунта демпфирующего слоя, мощность демпфирующего слоя и его положение в конструкции земляного полотна. Результатом

расчета является требуемый коэффициент устойчивости. В качестве основного критерия выбора того или иного варианта демпфирования служит минимальный объем демпфирующего слоя.

Перспективным направлением исследования в свете сделанных выводов является получение материалов с заданными свойствами, а также экспериментальное подтверждение выявленных методов повышения сейсмоустойчивости.

Библиографический список

1. СП 32-104-98. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм (утв. Госстроем России 27.12.1996; дата введения: 01.01.1999).
2. Меркурьев Ю. С. Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Динамический расчет по акселерограмме // Вестник УрГУПС. 2024. № 1 (61). С. 110–119.
3. Предложения по расчету устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок. М.: СоюздорНИИ, 1966.
4. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог: вопросы проектирования и расчета: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Трансжелдориздат, 1953. 827 с.
5. СП14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24.05.2018 № 309/пр). М.: Стандартинформ, 2018.
6. Plaxis. PLAXIS CONNECT Edition V20 [Электронный ресурс]. URL: https://www.plaxis.ru/support/manual_supplement/ (дата обращения: 06.03.2024).
7. 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.
8. Вознесенский Е. А., Кушнарева Е. С., Фуникова В. В. Природа и закономерности поглощения волн напряжений в грунтах // Вестник Московского университета. Серия: Геология. 2011. № 4. С. 39–47.
9. Гусев Е. Л. Конструктивные методы синтеза слоисто-неоднородных структур при воздействии упругих волн // Акустический журнал. 2008. № 5. С. 807–805.
10. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / пер. с англ.; под ред. А. Б. Фадеева, М. Б. Лисюка. СПб.: НПО «Геореконструкция Фундамент-проект», 2006. 384 с.
11. Сывороткин В. Л. Землетрясения // Пространство и время. 2011. № 2 (4). С. 124–137.

Дата поступления: 02.07.2024

Решение о публикации: 12.08.2024

Контактная информация:

МЕРКУРЬЕВ Юрий Сергеевич — ведущий инженер-проектировщик; merku50@mail.ru

Rayleigh damping influence on railway subgrade stability during seismic action

Yu. S. Merkuriev

JSC Leningrostroy, 190020, St. Petersburg, 10th Krasnoarmeyskaya str., 3в, lit. A, room 6-H

For citation: Merkuriev Yu. S. Rayleigh damping influence on railway subgrade stability during seismic action // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 3. P. 104–113. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-104-113

Abstract

Purpose: to consider the problem of railway subgrade stability under seismic conditions. Show the need to increase stability during an earthquake. Determine the possibility of increasing seismic resistance by introducing a damping layer into the structure. Determine the optimal damping parameters, taking into account the rational use of subgrade materials. **Methods:** calculations of embankment stability are carried out using the method of G. M. Shakhunyants. An earthquake is taken into account through an increase in shear forces acting on the cells of the sliding massif. The maximum accelerations of the compartments are determined based on the results of finite element method dynamic calculation of a stress-strain state of the embankment during an earthquake, which is specified through an accelerogram. **Results:** the effectiveness of using a damping layer in the embankment structure, introduced to increase seismic resistance, has been shown. The dependence of the stability coefficient of the embankment on the Rayleigh parameters of the material composing the body of the entire embankment has been determined. For the best material parameters, the optimal thickness and position of the damping layer in the structure are determined, at which the stability coefficient takes on a standard value and the volume of the damping layer is minimal. **Practical importance:** as an alternative to the normative approach, the possibility of increasing the stability of a railway embankment under earthquake conditions by introducing a damping layer into the structure is presented. An algorithm for selecting optimal damping parameters has been determined in order to increase seismic resistance.

Keywords: Railway subgrade, seismic impact, finite element method, stability, Rayleigh damping, damping layer

References

1. SP 32-104-98. Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznyh dorog kolei 1520 mm (utv. Gosstroem Rossii 27.12.1996; data vvedeniya: 01.01.1999). (In Russian)
2. Merkur'ev Yu. S. Modelirovanie sejsmicheskogo vozdejstviya na zemlyanoe polotno s dempfiroyushhim sloem. Dinamicheskij raschet po akselerogramme // Vestnik UrGUPS. 2024. № 1 (61). P. 110–119. (In Russian)
3. Predlozheniya po raschetu ustojchivosti otkosov vysokih nasypej i glubokih vyemok. M.: SoyuzdorNII, 1966. (In Russian)
4. Shakhunyancz G. M. Zemlyanoe polotno zheleznyh dorog: voprosy proektirovaniya i rascheta: uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta. M.: Transzheldorizdat, 1953. 827 s. (In Russian)
5. SP14.13330.2018. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah (utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishhno-kommunal'nogo hozyajstva RF ot 24.05.2018 № 309/pr). M.: Standart-inform, 2018. (In Russian)
6. Plaxis. PLAXIS CONNECT Edition V20 [Elektronnyj resurs]. URL: https://www.plaxis.ru/support/manual_supplement/ (data obrashheniya: 06.03.2024).

7. 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.
8. Voznesenskij E. A., Kushnareva E. S., Funikova V. V. Priroda i zakonomernosti pogloshheniya voln napryazhenij v gruntah // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya: Geologiya. 2011. № 4. P. 39–47. (In Russian)
9. Gusev E. L. Konstruktivnye metody sinteza sloisto-neodnorodnyh struktur pri vozdeystvii uprugih voln // Akusticheskij zhurnal. 2008. № 5. P. 807–805. (In Russian)
10. Ishihara K. Povedenie gruntov pri zemletryasenyah / per. s angl.; pod red. A. B. Fadeeva, M. B. Lisyuka. SPb.: NPO “Georekonstrukciya Fundament-proekt”, 2006. 384 s. (In Russian)
11. Syvorotkin V. L. Zemletryaseniya // Prostranstvo i vremya. 2011. № 2 (4). P. 124–137. (In Russian)

Received: 02.07.2024

Accepted: 12.08.2024

Author’s information:

Yuriy S. MERKURYEV — Leading design engineer; merku50@mail.ru