



Напряжённое состояние земляного полотна при воздействии вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс



Валерий КОССОВ
Valery S. KOSSOV

Олег КРАСНОВ
Oleg G. KRASNOV



Андрей ПРОТОПОВ
Andrey L. PROTOPOV

Коссов Валерий Семёнович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «ВНИКТИ», Коломна, Россия.
Краснов Олег Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий отделом АО «ВНИКТИ», Коломна, Россия.
Протопопов Андрей Леонидович – старший научный сотрудник АО «ВНИКТИ», Коломна, Россия.

Study of Roadbed Stress State from the Impact of Freight Cars with Axle Load up to 30 tnf
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 82)

Статья знакомит с результатами исследования напряжённого состояния деятельной зоны земляного полотна от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5, 25, 27 и 30 тс на конечно-элементной модели. С использованием теории предельного равновесия по фактически зарегистрированным уровням вибровоздействий определены уровни предельных напряжений для насыпи земляного полотна участка Голутвин–Озеры Московской железной дороги. Проведены экспериментальные замеры и анализ напряжений на основной площадке полотна и выполнена верификация расчётных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: железная дорога, земляное полотно, напряжённое состояние, грузовые вагоны, повышенные осевые нагрузки, предельные напряжения, влажность, вибровоздействия.

Развитие тяжеловесного движения на российских железных дорогах, внедрение грузовых вагонов с осевыми нагрузками 25 тс и в перспективе 27 и 30 тс остро ставят вопрос об оценке несущей способности земляного полотна насыпей из глинистых переувлажнённых грунтов при вибровоздействии подвижного состава. Повышенные осевые нагрузки приводят на некоторых участках к увеличению дефектов и деформаций земляного полотна [1–3].

Специалистами АО «ВНИКТИ» проведены теоретические и экспериментальные исследования напряжённого состояния (НС) основной площадки земляного полотна (ОПЗП) при воздействии от грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5, 25, 27, 30 тс. При этом изучалось влияние на уровни напряжений величин осевых нагрузок, скорости движения, упругих характеристик щебеночного балласта, песчаной подушки, а также соотношения их толщин.

Исследовано влияние уровней вибровоздействия (амплитуд виброколебаний

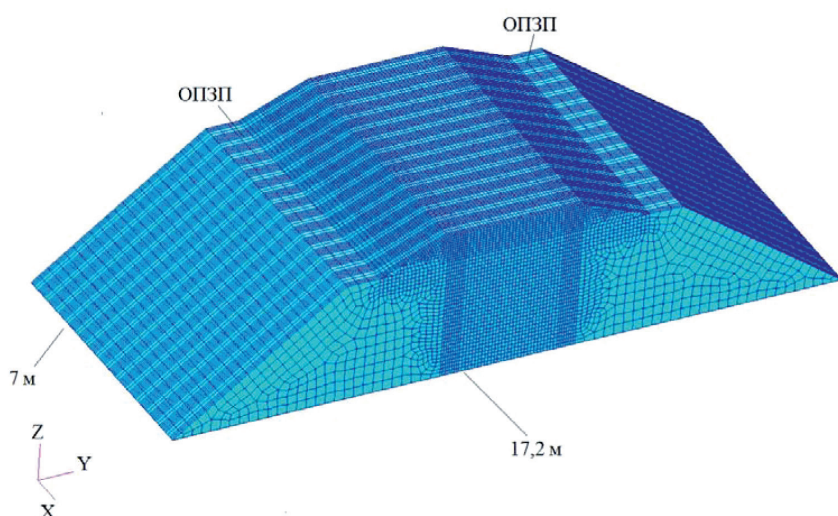


Рис. 1. Конечно-элементная модель земляного полотна с балластной призмой.

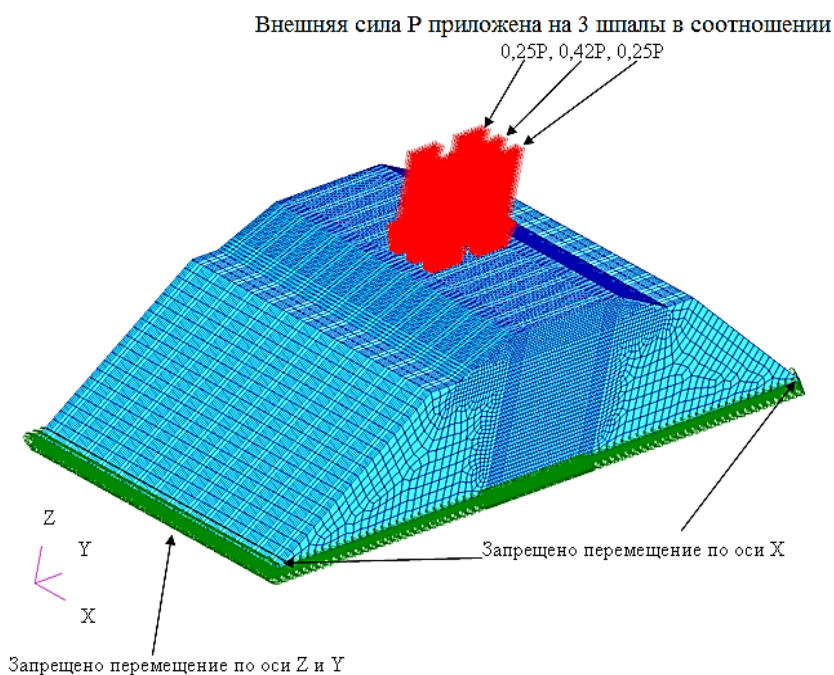


Рис. 2. Схема нагружения и закрепления конечно-элементной модели.

грунта на ОПЗП, получаемых экспериментально при проведении ходовых испытаний), влажности грунтов (показателя текучести J_L) на предельные напряжения земляного полотна. Теоретические исследования проводились на модели насыпи, геометрические параметры которой получены с помощью прямых измерений натурального участка пути, где были установлены приборы для регистрации силовых факторов и напряжений на ОПЗП.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА

Моделирование и расчёт проводились на базе метода конечных элементов, использовались программные комплексы PATRAN, NASTRAN, MARC.

На рис. 1 приведена конечно-элементная модель фрагмента пути (земляное полотно, балласт). В зависимости от высоты балласта количество Hex8-элементов в модели изменялось от 336 896 до



Расчётные модели для оценки влияния размеров и параметров слоёв балласта*

№ модели	Структура подшпального основания	Толщина балластного и подбалластного слоёв, м	Расчётные параметры балластного и подбалластного слоёв	
			Модуль деформации E, МПа	Коэффициент Пуассона, μ
1	балласт	0,3	254	0,27
	песчаная подушка	0,3	110	0,3
2	балласт	0,3	150	0,27
	песчаная подушка	0,3	80	0,3
3	балласт	0,4	254	0,27
	песчаная подушка	—	—	—
4	балласт	0,4	110	0,27
	песчаная подушка	—	—	—
5	балласт	0,4	254	0,27
	песчаная подушка	0,2	110	0,3
6	балласт	0,4	150	0,27
	песчаная подушка	0,2	80	0,3
7	балласт	0,4	254	0,27
	песчаная подушка	0,3	110	0,3
8	балласт	0,4	150	0,27
	песчаная подушка	0,3	80	0,3
9	балласт	0,5	254	0,27
	песчаная подушка	—	—	—
10	балласт	0,5	150	0,27
	песчаная подушка	—	—	—
11	балласт	0,5	254	0,27
	песчаная подушка	0,2	110	0,3
12	балласт	0,5	150	0,27
	песчаная подушка	0,2	80	0,3
13	балласт	0,5	254	0,27
	песчаная подушка	0,3	110	0,3
14	балласт	0,5	150	0,27
	песчаная подушка	0,3	80	0,3

* Данные по модулю упругости щебёночного балласта принимались по результатам испытания проб щебня, взятых с участка Голутвин—Озёры.

355 488, количество узлов — от 355 272 до 381 691.

В расчётах учитывалось влияние на НС насыпи следующих факторов:

- величин вертикальных сил, передаваемых от колеса на рельс;
- скорости движения поездов;
- соотношения толщин составляющих балластного слоя — щебня, подбалластного слоя;
- соотношения упругих характеристик элементов балластного слоя и земляного полотна.

В качестве исходных данных при моделировании принимали нагрузки, полученные при динамических испытаниях опытного поезда, включавшего грузовые вагоны

с осевыми нагрузками 23,5, 25, 27 и 30 тс [17]. На рис. 2 показаны граничные условия и схемы приложения нагрузок. Осевая нагрузка принималась распределённой на три шпалы в пропорции 0,25, 0,42 и 0,25. Оставшейся нагрузкой (0,08), распределённой на соседние шпалы, ввиду малого её значения пренебрегали.

Оценка прочности земляного полотна на основной его площадке проводилась путём сравнения расчётных напряжений сжима с допускаемыми значениями напряжений, равными 80 кПа. Их величина в действительности зависит от физико-механических параметров грунтов земляного полотна, степени увлажнения и уровней вибровоздействия. В работах [18–20]

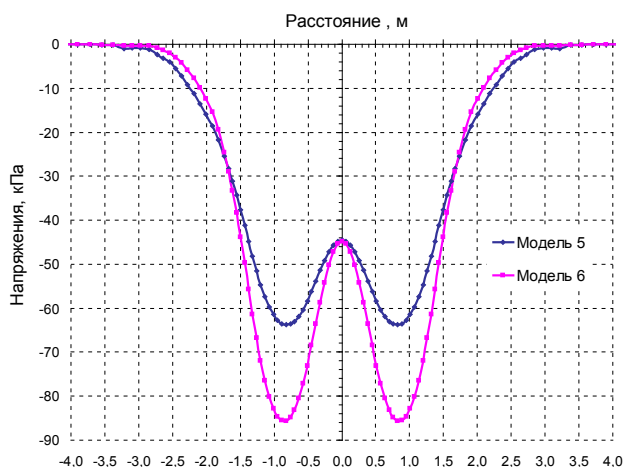


Рис. 3. Распределение напряжений при различных характеристиках модулей упругости балластного и подбалластного слоёв (осевая нагрузка 30 тс, скорость 90 км/ч).

даны результаты исследования модулей упругости при трёхосном сжатии в зависимости от числа циклов обжатия и величин давлений. Показано, что величина модуля упругости балластных материалов существенно зависит от степени уплотнения балласта, давления на поверхности при трёхосном сжатии и материала частиц щебня (гранит, базальт). Аналогичные исследования проведены специалистами центра испытаний материалов и конструкций — филиалом Октябрьской железной дороги на балластных материалах, песке и грунте, взятых с подшпального основания измерительного участка перегона Голтувин—Озеры.

Для оценки влияния структуры и упругих характеристик балластного слоя и песчаной подушки на напряжённое состояние ОПЗП было рассмотрено 14 расчётных моделей (таблица 1).

Для оценки условий прочности в расчётах принимались максимально вероятные значения вертикальных сил:

$$\bar{P}_e^{\max} = \bar{m}_{P_e}^N + 2,5\bar{\sigma}_{P_e}^N,$$

где $\bar{m}_{P_e}^N$ — математическое ожидание ансамбля вертикальных сил от воздействия колёсных пар грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5, 25, 27 и 30 тс; $\bar{\sigma}_{P_e}^N$ — среднее квадратическое отклонение ансамбля вертикальных сил от воздействия грузовых вагонов.

В реальной эксплуатации вероятность появления максимально вероятных значе-

ний вертикальных сил мала. Поэтому для верификации конечно-элементной модели с экспериментально полученным значением величин напряжений на ОПЗП принимали средние максимальные величины вертикальных сил, которые определялись из выражения:

$$P_e^{cp} = \bar{m}_{P_e}^N + \bar{\sigma}_{P_e}^N.$$

Для оценки влияния упругих характеристик балластного слоя и песчаной подушки представлены результаты расчётов напряжений на ОПЗП для двух вариантов моделей 5 и 6. На рис. 3 приведено распределение расчётных напряжений по поперечному сечению земляного полотна от максимально вероятных значений вертикальных сил грузовых вагонов с осевой нагрузкой 30 тс при скорости движения 90 км/ч.

Из графиков распределения напряжений на ОПЗП видно, что упругие характеристики — модули упругости балластного слоя и песчаной подушки существенно влияют на напряжение. Так, для одинаковой конструкции подбалластного строения, нормированного для путей I, II, и III класса — 0,4 м щебня и 0,2 м песка, значения напряжения могут отличаться на 30–40 %. Для расчётного случая (варианты 5 и 6) разница составила 34 %.

На рис. 4 представлено распределение напряжений в подшпальном пространстве для варианта 2. При этом в качестве значений вертикальных сил принимались максимально вероятные значения, полученные



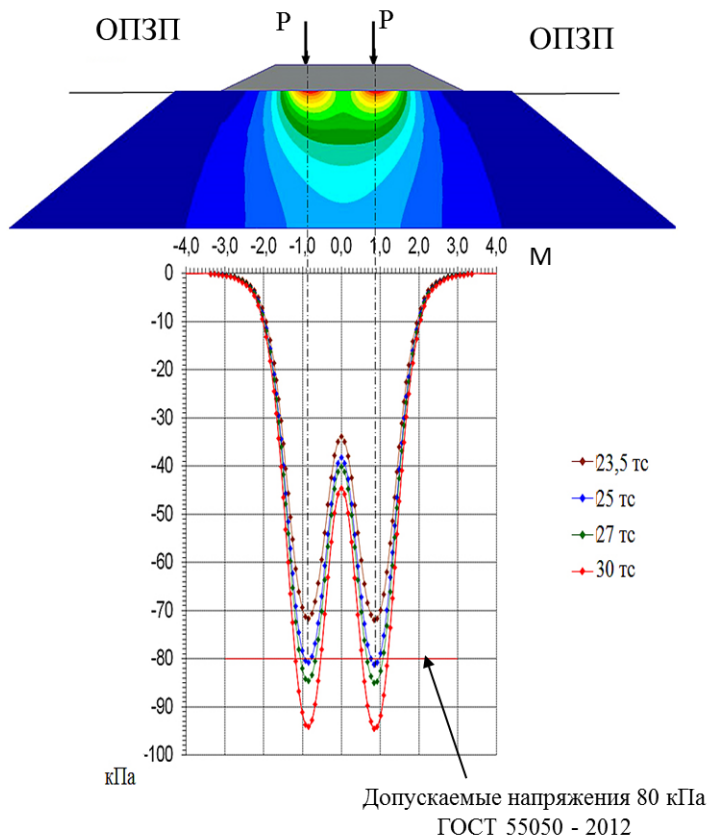


Рис. 4. Изменения напряжений на основной площадке земляного полотна в зависимости от осевых нагрузок при скорости движения 90 км/ч.

Таблица 2

Расчётные напряжения на основной площадке земляного полотна от максимально вероятных и средних значений вертикальных сил*

№ п/п	Скорость движения	Осевая нагрузка 23,5 тс	Осевая нагрузка 25 тс	Осевая нагрузка 27 тс	Осевая нагрузка 30 тс
1	40	59,8/51,1	64,5/52,1	67,2/55,7	71,9/59,6
2	60	61,1/53,1	67,7/56,7	69,0/60,7	72,5/64,9
3	80	63,2/54,6	70,1/58,4	72,5/62,4	78,6/66,7
4	90	65,7/56,2	74,1/60,1	77,6/64,3	86,3/68,8

* Числитель — максимально вероятные; знаменатель — средние значения вертикальных сил.

экспериментально во время проведения ходовых динамических испытаний полувагонов с осевыми нагрузками 23,5, 25, 27 и 30 тс.

Расчётные значения напряжений на ОПЗП (для варианта 2) от максимально вероятных и средних максимальных значений вертикальных сил представлены в таблице 2.

Проведены исследования на компьютерной модели зависимости значений напряжений на ОПЗП для полувагонов с осевой нагрузкой 30 тс от скорости дви-

жения, толщины балластного и подбалластного слоёв. Результаты расчётов представлены в таблице 3 и на рис. 5.

Исследование НС железнодорожной насыпи от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс показало:

- имеет место тенденция к росту напряжений на ОПЗП как с повышением осевой нагрузки, так и с увеличением скорости движения;
- на напряжённое состояние ОПЗП оказывают влияние упругие характеристики балластного слоя и песчаной по-

Таблица 3

Максимальные напряжения на основной площадке земляного полотна при осевой нагрузке 30 тс в зависимости от скорости и структуры балластного слоя

Модель	Структура балласта	Напряжения от осевой нагрузки 30 тс (кПа) при заданной скорости (км/ч)			
		40	60	80	90
4	Щебень 0,4 м	101,3	102,2	110,8	121,6
10	Щебень 0,5 м	81,4	82,1	89	97,7
6	Щебень 0,4 м Песок 0,2 м	71,3	71,9	78	85,6
12	Щебень 0,5 м Песок 0,2 м	61,4	62	67,2	73,7

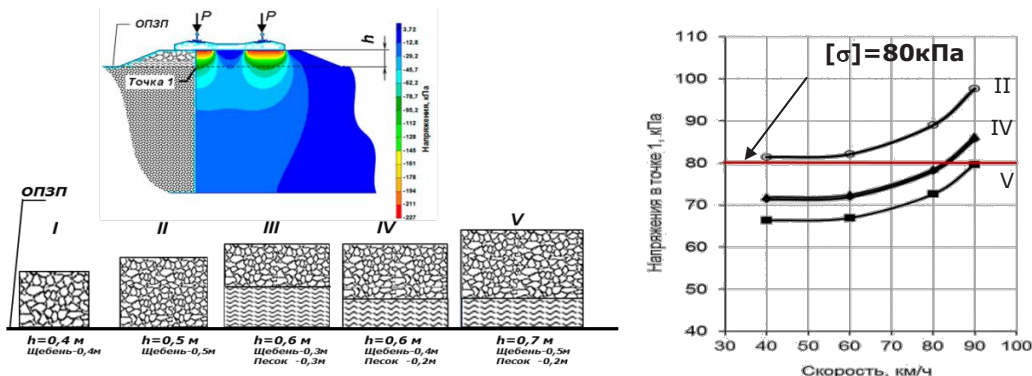


Рис. 5. Изменение напряжений на основной площадке земляного полотна в зависимости от структуры балластного и подбалластного слоев и скорости движения.

душки, толщина каждой из составляющих и общая толщина балластного слоя и песчаной подушки;

- при толщине балластного слоя 0,3 м и песчаной подушки 0,3 м (рис. 5) при действии максимально вероятных значений вертикальных сил и скорости движения до 90 км/ч напряжения на ОПЗП от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками 27 и 30 тс превышают допустимые значения $[\sigma_{зп}] = 80$ кПа, а от вагонов с осевыми нагрузками 25 тс — находятся в пределах 77,6 МПа;

- за счёт эффективного распределения усилий от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс и увеличения толщины балластного слоя можно добиться уровней напряжений на ОПЗП, не превышающих нормативные значения;

- при структуре балластного слоя, рекомендуемой для путей I, II и III классов и толщине слоя балласта 0,4 м, а песчаной подушки — 0,2 м, напряжения на ОПЗП от вагонов с осевыми нагрузками 30 тс превышают нормативные значения при скоростях движения более 80 км/ч;

- при изменении соотношения толщин балластного слоя и песчаной подушки НС земляного полотна зависимо изменяется (таблица 4);

- при увеличении балластного слоя до 0,5 м и толщине балластной подушки 0,2 м напряжения на ОПЗП не превышали нормативных значений 80 кПа от грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс и скорости движения до 90 км/ч.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ДЕЯТЕЛЬНОЙ ЗОНЕ

Для определения несущей способности железнодорожного земляного полотна была использована теория предельного равновесия. Применимость этой теории для инженерных расчётов и хорошая сходимость теоретических и практических значений нагрузок подтверждаются работами [8, 11, 12, 16].

Предельное напряжённое состояние подпального основания — такое состояние, при котором минимальное приращение статической или динамической нагрузки приводит к возникновению в балласте



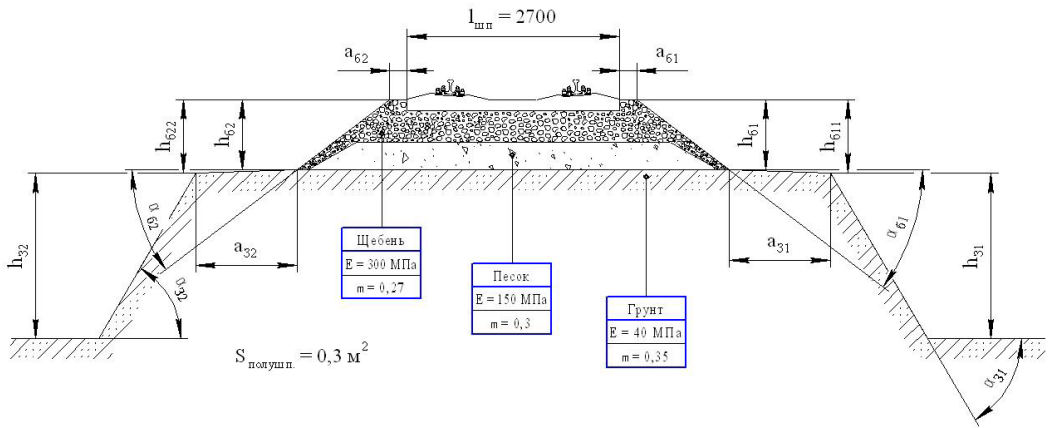


Рис. 6. Схема и геометрические размеры насыпи на измерительном участке.

Таблица 4

Геометрические параметры поперечного сечения железнодорожной насыпи на опытном участке

Сечения	Левая сторона							Правая сторона						
	a_{62} , м	h_{62} , м	h_{622} , м	α_{62} , °	h_{32} , м	a_{32} , м	α_{32} , °	a_{61} , м	h_{61} , м	h_{611} , м	α_{61} , °	h_{31} , м	a_{31} , м	α_{31} , °
5 м до	0,36	0,55	0,72	20,5	2,23	1,05	35	0,35	0,61	0,78	21,5	2,04	1,23	35,5
0 – в створе датчиков	0,34	0,61	0,77	22	2,42	1,00	34	0,36	0,56	0,75	23	2,23	1,17	26
5 м после	0,37	0,63	0,76	23	2,28	1,12	36	0,35	0,56	0,75	22,5	2,32	1,21	35,5
Среднее	0,36	0,60	0,75	21,8	2,31	1,06	35	0,35	0,58	0,76	22,3	2,20	1,20	35,7

и земляном полотне сплошных поверхностей скольжения, где сдвигающие силы превышают удерживающие. Поверхности скольжения представляют собой совокупность отдельных площадок, образовавшихся при превышении удерживающих сил сдвигающими. Касательные плоскости к поверхностям скольжения совпадают с площадками скольжения. Отдельные площадки скольжения могут образовываться в грунтовой среде и при нагрузках, не превышающих предельные, но они не вызывают деформаций массива. Лишь при нагрузках не ниже предельных формируются группы площадок – целые поверхности, где происходит сдвиговая деформация грунтового массива.

Используя алгоритмы [11], выполнено интегрирование конечно-разностным методом уравнений характеристик и дифференциальных соотношений по разработанной специалистами АО «ВНИКТИ» программе.

Расчёты проведены для насыпи, сложенной из глинистых грунтов.

Геометрические параметры поперечного сечения железнодорожной насыпи, объёмные характеристики грунтов, коэффициенты, характеризующие снижение прочностных свойств грунтов, представлены на рис. 6 и в таблице 4.

Расчёты несущей способности земляного полотна выполнены для:

- насыпи высотой 3,1 м с геометрическими параметрами, которые определены путём прямого геометрического измерения по сечению установки измерительных приборов;
- земляного полотна, сложенного глинистыми грунтами;
- уровней виброколебаний на ОПЗП, зарегистрированных от воздействия грузовых вагонов с разными осевыми нагрузками при качении колёс по рельсам при отсутствии неровностей на поверхности катания;
- случая изменения влажности грунта при изменении показателя текучести с $J < 0,25$ до $0,25 < J < 0,5$.

В результате экспериментальных исследований вибрационных воздействий на

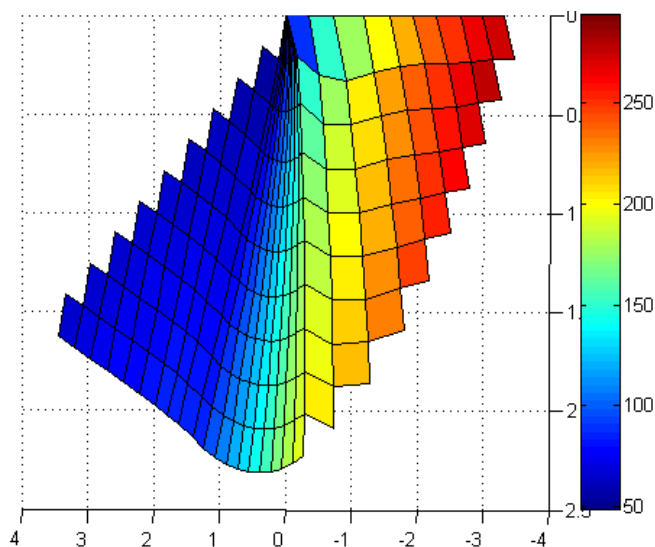


Рис. 7.
Распределение
предельных
напряжений
по линиям
скольжения.

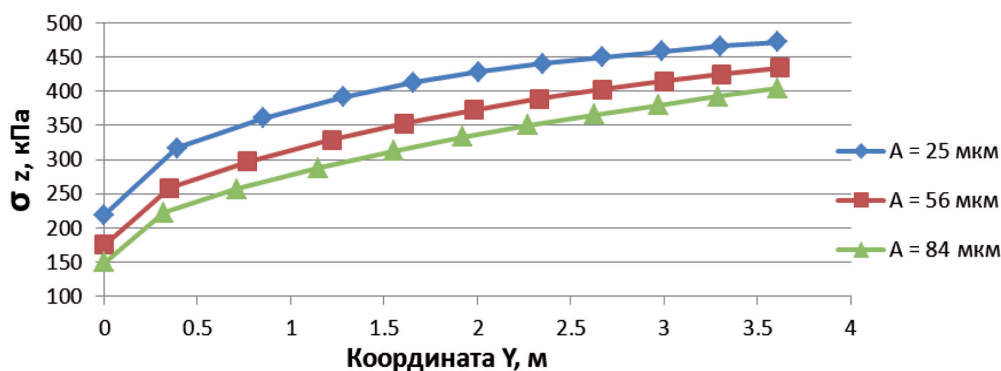


Рис. 8. Предельные значения напряжений на основной площадке земляного полотна.

элементы верхнего строения пути установлено, что при увеличении осевых нагрузок на колесо имеется тенденция к повышению вибраций. При этом чем выше скорость движения, тем выше уровни ускорений. При увеличении осевых нагрузок с 23,5 до 30 тс уровни виброколебаний¹ на ОПЗП изменялись в пределах от 40–48 до 57–84 мкм. Для насыпи с геометрическими параметрами, представленными на рис. 6, сложенной из глины с углом внутреннего трения $\phi = 19^\circ$, относительным сцеплением $C = 0,054$ МПа рассчитаны распределения нормальных напряжений по линиям скольжения (рис. 7) и предельные значения на-

пряжений на ОПЗП для разных уровней виброперемещений (рис. 8).

Анализ расчётных данных показал, что для глин с рассматриваемыми физико-механическими показателями при текучести $J < 0,25$ уровни напряжений, возникающие от грузовых вагонов с осевой нагрузкой 30 тс, имеют запас прочности по несущей способности насыпи.

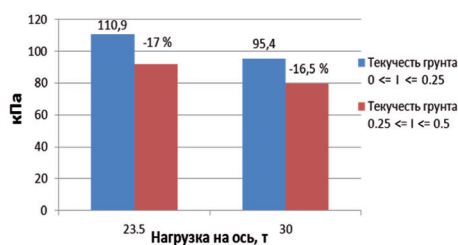
Выполнены расчёты предельных напряжений для условий сложения насыпи глинами и суглинками, а также увеличения влажности грунта с $J < 0,25$ до $0,25 < J < 0,5$.

Установлено, что несущая способность земляного полотна существенно зависит от типа грунта и его физико-механических свойств.

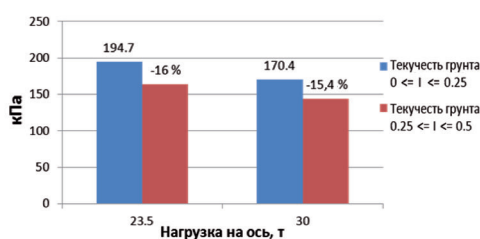
При движении вагонов с осевыми нагрузками 30 тс по насыпи, сложенной из глины, минимальное предельное напряже-

¹ Экспериментально определялись уровни ускорений на ОПЗП. Виброперемещения – путём пересчёта двойным интегрированием процессов зарегистрированных ускорений.





суглинок



глина

Рис. 9. Изменение минимальных предельных напряжений в зависимости от влажности грунта при различных осевых нагрузках.

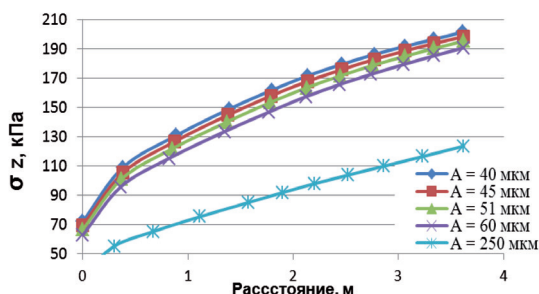
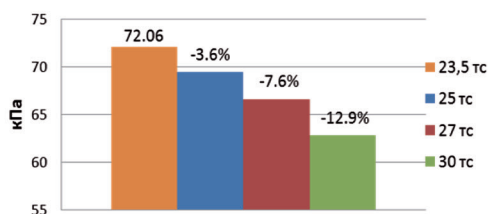
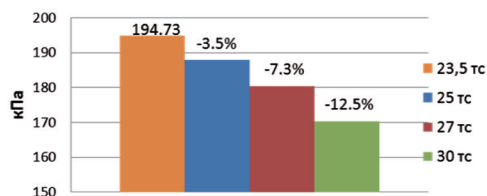


Рис. 10. Изменение предельных напряжений в зависимости от уровня вибраций (грунт – суглинок $\phi = 20^\circ$, $C = 0,019$ МПа, показатель текучести грунта $0 \leq J \leq 0,25$).



суглинок $C = 0,019$, $\phi = 20^\circ$



глина $C = 0,054$, $\phi = 19^\circ$

Рис. 11. Изменение минимальных предельных напряжений в зависимости от величин осевых нагрузок.

ние составляет 170,4 МПа, при переходе на суглинки величины предельных напряжений снижаются до 95,4 МПа. При изменении показателя текучести с $J < 0,25$ до $0,25 < J < 0,5$ несущая способность грунтов снижается в среднем на 15,4–16 % для глин и 16,5–17 % для суглинков (рис. 9).

Выполнены расчёты для случая высоких вибровоздействий на ОПЗП, что характерно для ударного взаимодействия колёс с рельсами в зонах болтовых стыков, при отслоениях металла от поверхности катания со сверхнормативными параметрами и т.д.

Установлено, что увеличение уровней виброколебаний на ОПЗП приводит к сни-

жению уровней предельных напряжений в 1,26–1,36 раза, т.е. на 26–36 % (рис. 10).

Снижение несущей способности земляного полотна от изменения осевой нагрузки с 23,5 до 30 тс за счёт повышения вибронагруженности составляет 12,5–12,9 % (рис. 11).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для верификации результатов компьютерного моделирования проведены экспериментальные измерения напряжений на ОПЗП на полигоне АО «ВНИКТИ» (участок Голутвин–Озеры). Верхнее строение

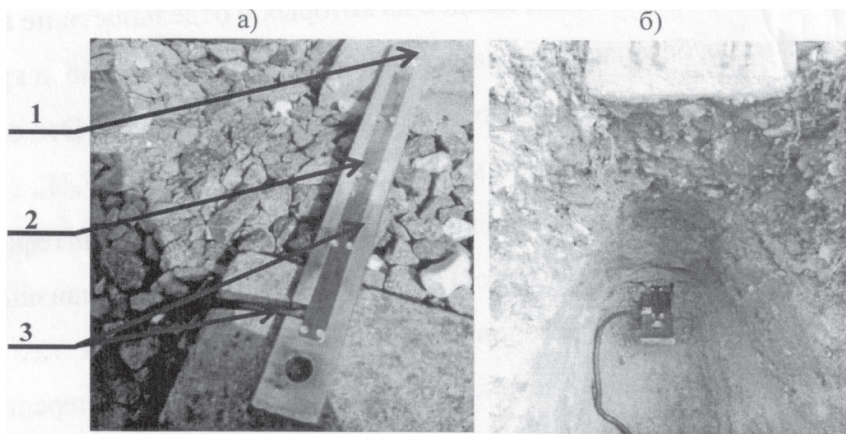


Рис. 12. Общий вид устройства для измерения давлений на основной площадке земляного полотна: а) пластина с закреплённой месдозой; б) устройство с месдозой, установленное в земляное полотно.

включало: рельсы Р65, шпалы железобетонные, крепления КБ-65, балласт щебёночный толщиной 0,3 м, песчаная подушка толщиной 0,3 м, земляное полотно — суглинок.

Исследование напряжений на ОПЗП выполнено с использованием месдоз типа KDE-200КРА (Япония). Для возможности их оперативной установки под рельсошпальную решётку специалистами ВНИКТИ разработана новая конструкция устройства (рис. 12).

Экспериментальный замер напряжений представляет определённые трудности, связанные с помещением месдозы внутрь грунтового массива. Этот процесс вызывает нарушение монолитности массива и появление искажений в силовом поле, что потребовало и совершенствования самого способа измерения напряжений в земляном полотне. Модернизированное устройство состоит из месдозы, несущей пластины, а упругая мембрана поставлена положением вверх и соприкасается с грунтом при проведении измерений (рис. 12).

Внутри пластины находится кабель-канал 3 для прокладки проводов от измерительных датчиков месдозы. Тарировка месдоз проводилась при ступенчатом

нагрузении рабочей мембраны равномерно распределённой нагрузкой в диапазоне давлений от 0 до 200 кПа и с шагом 20 кПа.

Конструкция месдозы позволяет без нарушения целостности грунта устанавливать устройство на площадку земляного полотна под подошвой шпалы с размещением деятельной зоны под рельсом на глубине до 1 м ниже слоя балласта.

Апробация устройства проводилась на названном уже перегоне Московской железной дороги. Месдоза с пластиной забивалась на глубину до 650 мм ниже подошвы шпалы под слой щебня и песчаной подушки. В поперечном направлении месдоза устанавливалась под рельсом.

Замеры выполнялись при проезде грузового локомотива 2ТЭ116 со скоростями 20–90 км/ч в течение двух дней. Результаты представлены в таблице 5.

Анализ результатов измерений показал:

- по мере увеличения пропущенного над измерительным сечением подвижного состава напряжения снижались в среднем на 6–7,5 %, что может быть объяснено деформированием локально-уплотнённых зон грунта при внедрении пластин с месдозой в зону ОПЗП;

Таблица 5

Напряжения на основной площадке земляного полотна от проезда локомотива 2ТЭ116

Скорость, км/ч	11.05.2017	12.05.2017	Уменьшилось на ...%
40	71,65	67,03	6,4
50	73,25	67,66	7,5
80	76,58	72,00	5,9
90	81,80	75,69	7,45





Экспериментальные напряжения на основной площадке земляного полотна
от грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс

Замер №	Скорость, км/ч	Вагон 23,5 тс		Вагон 25 тс		Вагон 30 тс	
		Тележка № 1	Тележка № 2	Тележка № 1	Тележка № 2	Тележка № 1	Тележка № 2
1	40	59,218	53,673	49,223	52,509	66,132	67,433
3	60	54,357	55,115	47,306	56,690	63,736	71,335
5	80	52,167	59,428	54,768	63,805	62,778	76,128
7	90	58,196	59,810	69,418	65,653	67,022	79,961
9	90	55,8	62,577	71,267	63,531	65,653	79,071
11	90	55,594	64,426	70,308	63,189	61,682	77,565
13	80	57,237	61,208	36,010	68,118	61,477	78,592
15	80	50,866	53,193	48,264	62,998	61,956	75,443
17	5	46,005	47,511	47,511	47,648	57,917	59,697
19	60	54,015	54,357	57,027	39,228	60,587	63,325

- уровни напряжений имели значения, близкие к расчётным;
- с увеличением скорости движения имело место повышение уровней напряжений на ОПЗП.

Дальнейшим шагом являлось определение напряжений на ОПЗП от воздействия грузовых вагонов — серийного с тележкой 18—100 и вагонов-углевозов, загруженных до осевых нагрузок 23,5, 25 и 30 тс. Результаты измерений даны в таблице 6.

Представлены напряжения на ОПЗП при движении опытного поезда в направлении Голутвин—Озеры для случая, когда тележки № 2 были первыми по ходу движения. Сравнительный анализ расчётных (таблица 2) и экспериментальных (таблица 6) данных позволяет констатировать:

- расхождения между результатами расчёта и экспериментально замеренными напряжениями на ОПЗП не превышают 15 %;
- напряжения на ОПЗП от воздействия колёс подвижного состава имеют разброс до 10 %, что связано с колебаниями подрессоренных масс подвижного состава и разными величинами вертикальных нагрузок, действующих на путь при прохождении колёс над зоной установки месдозы.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Выполненные на конечно-элементной модели теоретические исследования напряжённого состояния земляного полотна от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс показали:

- уровни напряжений на ОПЗП монотонно повышаются с увеличением осевых

нагрузок и скоростей движения: по расчётным данным при максимально вероятных силах — на 16—24 %, по экспериментально зарегистрированным данным — на 20—21 %;

- на уровни напряжений на ОПЗП оказывают влияния толщины слоёв балласта и песчаной подушки, их соотношение и упругие характеристики — модули упругости балластного и подбалластного слоёв, при этом значения напряжений могут отличаться на 30—40 %;

- для наиболее распространённых грунтов — суглинков при уровнях вибровоздействий, создаваемых от грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс при толщине щебёночного балласта 0,5 м и песчаной подушке 0,2 м, уровни напряжений на ОПЗП составляют 77,6 кПа и не превышают нормативного значения 80 кПа при скоростях движения до 90 км/ч.

2. Расчётами несущей способности земляного полотна по теории предельного равновесия установлено:

- предельные напряжения зависят от физико-механических свойств грунтов насыпи, её геометрических параметров (высоты, значений углов откоса и др.), влажности, уровней вибродинамического воздействия;

- повышение уровней вибровоздействий с 60 до 250 мкм (характерных для ударного взаимодействия при наличии дефектов на поверхности катания колёс или рельсов) снижает несущую способность насыпи на 26—32 %; увеличение влажности грунта с $J < 0,25$ до $0,25 < J < 0,5$ — на 15—17 %;

• повышение осевой нагрузки с 23,5 до 30 тс снижает несущую способность грунтов за счёт увеличения уровней вибровоздействия в среднем на 12,5–12,9 %.

3. Сравнительный анализ расчётных напряжений на ОПЗП по средним значениям вертикальных сил показал достаточно хорошую сходимость расчётных и экспериментальных данных: расхождение не превышало 15 %.

4. Дополнительно для принятия решения о внедрении грузовых вагонов с осевыми нагрузками 27 и 30 тс требуется:

- установить влияние повышенных осевых нагрузок на устойчивость железнодорожных насыпей на слабых основаниях;
- определить интенсивности накопления остаточных деформаций деятельной зоны земляного полотна при повышенных осевых нагрузках с учётом нахождения грунтов в мягкопластичном состоянии в зонах недостаточной работы дренажных систем, особенно в период оттаивания грунтов и их переувлажнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлева Т. Г., Карпушенко Н. И. и др. Железнодорожный путь. — М.: Транспорт, 1999. — 405 с.

2. Прокудин И. В. Деформации старых железнодорожных насыпей из глинистых грунтов при скоростном движении поездов // Вестник ВНИИЖТ. — 1979. — № 6. — С. 38–41.

3. Иванов А. Г. Исследование особенностей работы пути на участках обращения тяжёловесных поездов / Дис... канд. техн. наук. — Днепропетровск, 1984. — 200 с.

4. Шахунянц Г. М., Яковлева Т. Г. Интегральная оценка динамического состояния железнодорожных насыпей // Труды МИИТ. — Вып. 667: Вопросы пути и путевого хозяйства. — М., 1980. — С. 3–17.

5. Яковлева Т. Г. Прогнозирование деформируемости железнодорожных насыпей с учётом их динамического состояния // Земляное полотно и геотехника на железнодорожном транспорте: Межвуз. сб. науч. трудов. — Днепропетровск: ДИИТ, 1983. — С. 11–18.

6. Блажко Л. С. Технично-технологическая оценка усиления конструкции пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН / Дис... док. техн. наук. — СПб., 2003. — 331 с.

7. Берестяный Ю. Б. Прочность высоких железнодорожных насыпей из глинистых грунтов при воздействии поездов с повышенными осевыми и погонными нагрузками в условиях Дальневосточной

железнодорожной / Дис... канд. техн. наук. — Ленинград, 1990. — 232 с.

8. Морозова А. А. Несущая способность подпального основания железнодорожного пути на участках обращения поездов с осевыми нагрузками до 300 кН / Дис... канд. техн. наук. — СПб.: ПГУПС, 2014. — 184 с.

9. Наумов В. В. Обеспечение работоспособности железнодорожных насыпей на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками / Дис... канд. техн. наук. — М.: МИИТ, 2013. — 164 с.

10. Вериги М. Ф. Метод расчёта деформаций земляного полотна при действии на него динамических нагрузок // Вестник ВНИИЖТ. — 1988. — № 5. — С. 41–45.

11. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку / Дис... док. техн. наук. — Л.: ЛИИЖТ, 1982. — 455 с.

12. Стоянович Г. М. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна при повышенной вибродинамической нагрузке в упруго-пластической стадии работы грунтов. — Хабаровск: ДВГУПС, 2002. — 360 с.

13. Коссов В. С. Результаты экспериментальных и теоретических исследований воздействия подвижного состава на путь в перспективных условиях эксплуатации // Бюллетень Объединённого ученого совета ОАО «РЖД». — 2013. — № 5. — С. 27–36.

14. Лапидус Л. С. Несущая способность основной площадки железнодорожного земляного полотна. — М.: Транспорт, 1978. — 125 с.

15. Краснов О. Г., Астанин Н. Н. Влияние ударных сил на прочностные характеристики железнодорожного земляного полотна // Вестник ВНИИЖТ. — 2017. — № 2. — С. 85–93.

16. Колос А. Ф., Николайтис Д. С., Морозова А. А. Оценка чувствительности путевого щебня к действию вибродинамической нагрузки // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути (чтения, посвящённые 100-летию проф. Г. М. Шахунянца). — М.: МИИТ, 2013. — С. 164–166.

17. Комплексные сравнительные исследования воздействия на инфраструктуру вагонов с осевой нагрузкой до 30 тс на участках Голутвин—Озёры Московской ж.д.: Отчёт о НИР № И-06—17. — Коломна: ВНИКТИ, 2017. — 111 с.

18. Kaya M., Jernigan R., Runesson K., Sture S. Reproducibility and conventional triaxial tests on ballast material / Technical Report, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder, Boulder, Colorado, USA. — 1997. — Report No. 1. — 43 p.; Report No. 2. — 40 p.

19. Indraratna B. Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests / Indraratna B., et al. // Journal of Geotechn. and Geoenvironmental Eng., ASCE. — May 1998. — Pp. 439–449.

20. Lackenby J. Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading / Lackenby J., Indraratna B., et al. // Geotechnique, 57. — 2007. — № 6. — Pp. 527–536. ●

Координаты авторов: **Коссов В. С.** — vnikti@ptl-kolomna.ru, **Краснов О. Г.** — +7(496) 618–82–48, **Протопопов А. Л.** — vnikti@ptl-kolomna.ru.

Статья поступила в редакцию 01.08.2017, принята к публикации 29.08.2017.

Работа выполнена по проекту РФФИ 17–20–01088.

