

Таблица 1 – Значения ΔX_o и ΔX_d смещений ПЭП, вызывающих ослабление на 6 дБ амплитуд донного сигнала U_o при и эхо-сигнала от модели дефекта U_d

ΔX_o , мм, для ПЭП		ΔX_d , мм, для ПЭП	
типового $2a = 12$ мм	широкозахватного $a = 10$ мм, $l = 40$ мм	типового $2a = 12$ мм	широкозахватного $a = 10$ мм, $l = 40$ мм
≈ 4	≈ 14	≈ 3	≈ 10

Вывод. Результаты экспериментальных исследований подтверждают целесообразность апробации изложенного предложения при контроле рельсов, уложенных в пути (см. рис. 1, 2 и табл.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / Под ред. А.К. Гурвича. – М.: Транспорт, 1983. – 318 с.
2. Классификация дефектов рельсов НТД/ЦП 1 – 93. – М.: Транспорт, 1993. – 64 с.
3. Марков А.А., Шпагин Д.А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. 2-ое изд. перераб. и доп. – СПб.: Образование – Культура, 2008. – 283 с.

УДК 629.4.015

Достиярова Алия Мухамедияровна – к.т.н., доцент (Алматы, КазАТК)

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

При эксплуатации и строительстве новых железных дорог немаловажной является возможность определять, как меняется напряженно-деформированное состояние земляного полотна с течением времени. Учитывать сезонные изменения работы железнодорожных насыпей в расчете необходимо, поскольку это позволяет выделять неблагоприятные условия эксплуатации. Для расчета земляного полотна на напряженно-деформированное состояние необходима математическая модель, позволяющая учитывать сезонные изменения работы земляного полотна.

Для определения грунтового строения исследуемого объекта применялись метод инженерно-геологического бурения и метод сейсмопрофилирования в пунктах измерения колебаний пробурены скважины, из которых взяты пробы грунта. В результате лабораторного исследования установлено наименование грунтов и определены их физико-механические характеристики /1/: удельное сцепление C , угол внутреннего трения φ , модуль общей деформации E , коэффициент Пуассона ν и плотность ρ , которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики грунтов насыпи

Наименование грунта	C , кПа	φ , градус	E , кПа	ν	ρ , кН/м ³
Щебень	13	45	400000	0,23	20
Песко - гравий	2	35	120000	0,28	20
Суглинок насыпи	22,5	19	50000	0,35	20
Суглинок (основание)	30	40	50000	0,35	20

На рисунке 1 представлено поперечное сечение исследуемого участка земляного полотна, верхняя часть которого отсыпана щебеночным балластом и песчано-гравийным грунтом на глубину до 1,8 м под верхним строением пути. На откосах толщина песчано-гравийного слоя плавно убывает. Ниже, под песчано-гравийной отсыпкой, расположены суглинистые грунты, состояние которых весной меняется от мягкопластичного до текучепластичного, летом - в зависимости от количества выпавших осадков, показатель текучести находится в диапазоне 0,75-0,25.

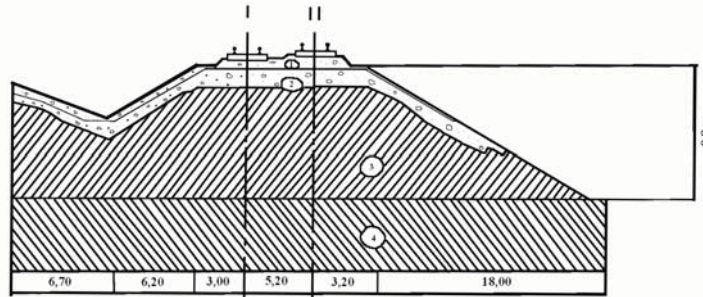


Рисунок 1 – Поперечное сечение исследуемой насыпи:
1 - щебень, 2 - песчано-гравийный слой, 3 - суглинок земляного полотна,
4 - суглинок основания земляного полотна.

При формировании математической модели земляного полотна использованы методы механики сплошной среды. Переход в пластическое состояние грунтовой среды осуществляется по закону Кулона-Мора.

Упругопластическое решение получено методом «начальных напряжений» [2]. «Упругие» напряжения, полученные в результате линейно-упругого решения, сравниваются со значением реальных («теоретических») напряжений, которые имела бы среда при рассчитанном уровне деформаций. Разница между «упругими» и «теоретическими» напряжениями рассматривается как невязка и прикладывается к системе конечных элементов в виде дополнительных узловых сил. В результате повторного упругого решения с новым вектором узловых сил «упругие» напряжения окажутся ближе к «теоретическим». Новая невязка добавляется к системе конечноэлементных уравнений и итерационная процедура продолжается до тех пор, пока разница между «упругими» и «теоретическими» напряжениями не будет превышать заданной точности.

Расчетная модель железнодорожного полотна содержит следующие конструктивные элементы [3]: основание земляного полотна; тело земляного полотна с параметрами, отвечающими установленным нормам; конструкция, имитирующая верхнее строение пути, способная правильно передавать нагрузку на основную площадку земляного полотна; вертикальная сила, заменяющая нагрузку от единицы подвижного состава.

Согласно методу конечных элементов, поперечное сечение насыпи и его основание разбито на простые геометрические фигуры - четырехугольники (рисунок 2). Очертание поперечного сечения насыпи построено по данным геодезического нивелирования. Разбивка поперечника на элементы произведена в соответствии с геологическим строением и его конструктивными особенностями, причем ширина элемента не превышает 1 м. Разными цветами показаны грунты, слагающие земляное полотно и его основание. Для каждого вида грунта с присущими ему физико-механическими характеристиками задан определенный цвет. Серым цветом показан слой щебеночных накоплений, бурым - песчано-гравийный слой, зеленым - суглинки, слагающие насыпь. Основание сложено из суглинков, окрашенных в оранжевый цвет. Введение оттенков зеленого и бурого означало неоднородность суглинка и песчано-гравийного слоя по значениям механических характеристик. В верхней части насыпи расположена балластная призма, отсыпанная щебнем высотой 0,4 м.

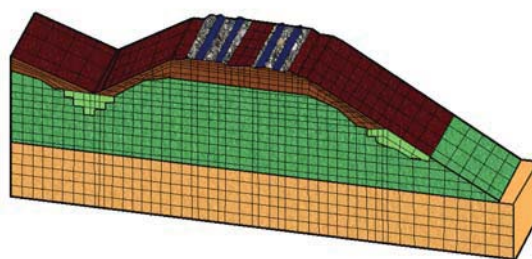


Рисунок 2. – Расчетная схема земляного полотна

Длина расчетной схемы земляного полотна составила 7 м, что равно половине длины четырехосного полувагона. Вдоль оси пути модель насыпи разбита на поперечники толщиной равной ширине железобетонной шпалы 0,2 м и расстоянию между шпалами 0,3 м согласно эпюре шпал 2000 шт/км.

Простые гексаэдры земляного полотна и основания преобразованы в элементы, описывающие работу упругопластической модели с критерием Кулона-Мора. Физико-механические характеристики грунтов земляного полотна приведены в таблице 1.

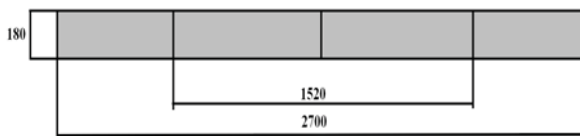


Рисунок 3. – Поперечное сечение рельсошпальной решетки, в мм

В соответствии с нормативами для железной дороги колеи 1520 мм, в расчетной схеме принята конструкция рельсошпальной решетки (рисунок 3). Железобетонные шпалы по 2000 шт/км представлены упругими элементами, для которых заданы характеристики: модуль упругости $E = 24 \cdot 10^3$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,16$; плотность $\rho = 24$ кН/м³. Рельсы Р65 представлены пространственными стержнями с характеристиками: модуль деформации $E = 0,21 \cdot 10^9$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; удельный вес $\rho = 78$ кН/м³; площадь поперечного сечения $S = 82,65$ см²; момент инерции поперечного сечения относительно горизонтальной и вертикальной осей соответственно 3540 см⁴ и 564 см⁴.

Решение упругопластической задачи реализовано с помощью программы «FEM models».

Формирование статической модели земляного полотна произведено по шагам. Первым шагом определено напряженно-деформированное состояние основания насыпи от собственного веса. На втором шаге добавлено тело насыпи.

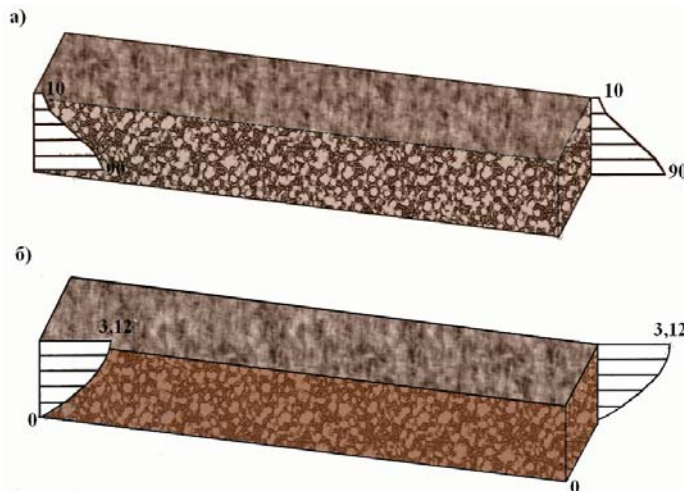


Рисунок 4. – Распределение
а) вертикальных нормальных
напряжений (кПа) и б) верти-
кальных перемещений
основания земляного полотна от
веса грунта (мм)

Распределение вертикальных нормальных напряжений и вертикальных перемещений основания земляного полотна от веса грунта приведено на рисунке 4.

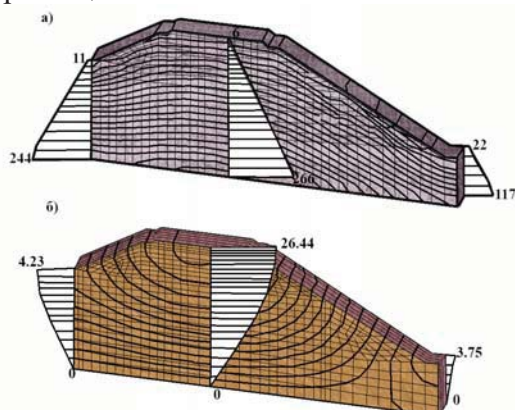


Рисунок 5. – Распределение:
а) вертикальных нормальных
напряжений (кПа) и б) вертикальных
перемещений (мм) в земляном полотне
от собственного веса

Вертикальные нормальные напряжения от веса верхних слоев грунта передаются на нижние, распределяясь по мере углубления. На поверхности основания (рисунок 4) и насыпи (рисунок 5) вертикальные напряжения от веса грунта равны нулю, которые с глубиной плавно нарастают по линейной зависимости до 100 кПа и до 266 кПа соответственно. Изолинии вертикальных перемещений Δz распределены равномерно. От веса грунта основания величина Δz на поверхности достигает 3,12 мм, от веса земляного полотна - 26,44 мм. С глубиной вертикальные перемещения грунта земляного полотна постепенно убывают до нуля. Концентрация вертикальных напряжений и вертикальных перемещений в обоих случаях не наблюдается, что свидетельствует о том, что вес грунта насыпи и основания распределен равномерно.

В результате действия веса грунта насыпи в земляном полотне образовалась пластическая зона (на рисунке 6 показана красным цветом). Зона пластики площадью поперечного сечения $11,8 \text{ м}^2$ зарождается на глубине 7 м и уходит вглубь до подошвы насыпи.

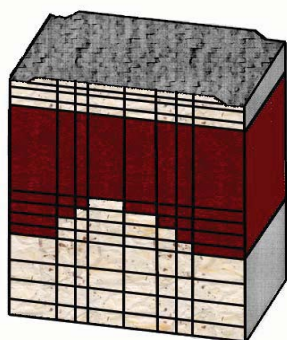


Рисунок 6. – Образование пластической зоны в
земляном полотне от собственного веса

На третьем шаге произведено нагружение модели земляного полотна, статической нагрузкой по 115 кН (что соответствует осевой нагрузке 4-осного полувагона, груженного углем, равной 230 кН/ось) в точках соприкосновения рабочей грани колеса с внутренней головкой рельса (на рисунке 7 стрелками показаны места приложения нагрузки).

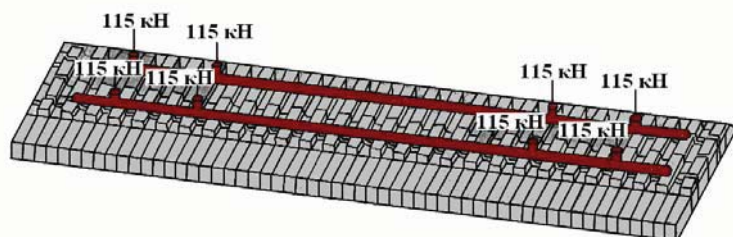


Рисунок 7. – Схема
нагружения расчетной
модели земляного полотна

В итоге решения задачи получено напряженно-деформированное состояние земляного полотна от статической нагрузки. На рисунках 8 - 9 показано распределение нормальных вертикальных и горизонтальных напряжений в земляном полотне при действии статической нагрузки.

Максимальный уровень вертикальных и горизонтальных напряжений отмечен в верхней части земляного полотна вокруг места приложения нагрузки. Под шпалой вертикальные напряжения сконцентрированы вокруг сечений приложения нагрузки. От подрельсового сечения до торца шпалы σ_z меняются в диапазоне 130-79 кПа. По оси пути σ_z достигают 111 кПа. Изолинии вертикальных напряжений σ_z распространяются вглубь в форме «луковицы». На уровне основной площадки концентрация вертикальных напряжений в 2 раза снижается, и от подрельсового сечения до торца шпалы диапазон сокращается до 90-60 кПа. На глубине 1,36 м зона максимальных напряжений смещается к центру тележки (рисунок 8 б) и достигает 22 кПа. С глубины 1,36 м вертикальные напряжения изменяются незначительно, по всем сечениям наблюдается их выравнивание. На бровке земляного полотна σ_z не превышают 1 кПа.

Изолинии горизонтальных напряжений под шпалой сосредоточены по площади опирания шпалы на балласт. На уровне основной площадки σ_x начинают расходиться от места приложения нагрузки в сторону левого и правого откоса насыпи. На глубине 0,64 м под рельсошпальной решеткой горизонтальные напряжения имеют практически нулевые значения, что хорошо видно на рисунке 9 в). По бокам от пути σ_x достигают 22 кПа. На глубине 0,88 м горизонтальные напряжения выравниваются и по величине не превышают 10 кПа.

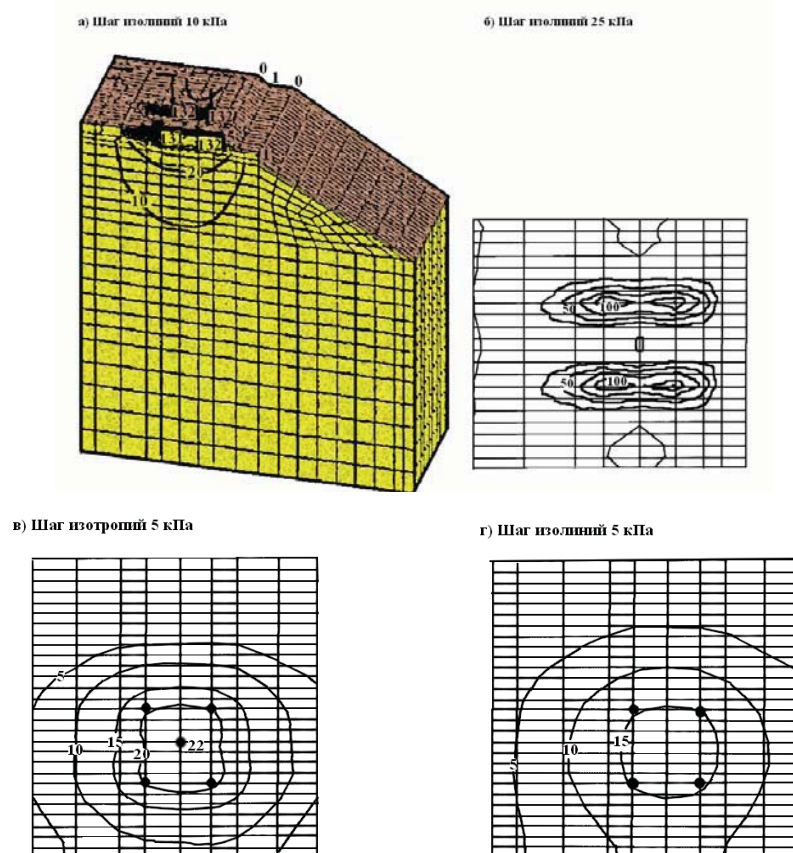
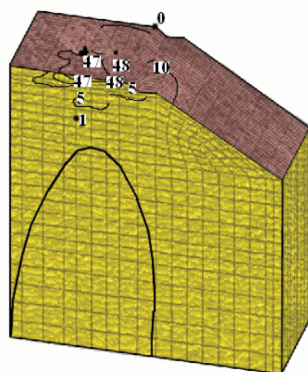
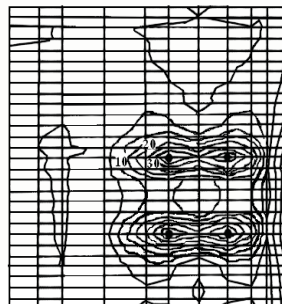


Рисунок 8 – Распределение вертикальных нормальных напряжений:
а) в земляном полотне; б) под шпалой; в) на глубине 1,36 м; г) на глубине 1,8 м
(точками показаны сечения приложения нагрузки) при действии статической нагрузки (кПа)

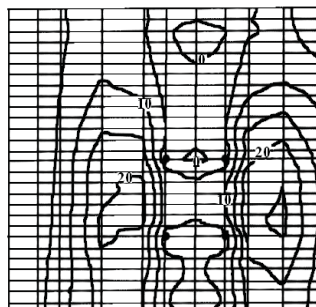
а) Шаг изолиний 10 кПа



б) Шаг изолиний 10 кПа



в) Шаг изолиний 5 кПа



г) Шаг изолиний 5 кПа

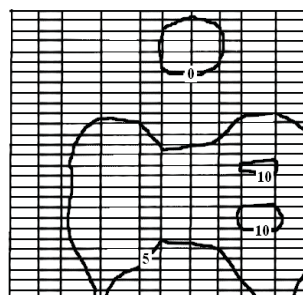


Рисунок 9 – Распределение горизонтальных нормальных напряжений:

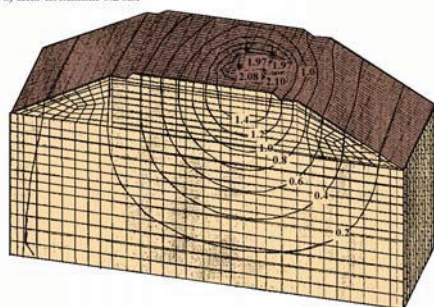
а) в земляном полотне; б) под шпалой; в) на глубине 0,64 м; г) на глубине 0,88 м (точками показаны сечения приложения нагрузки) при действии статической нагрузки (кПа)

Расчетный уровень вертикальных и горизонтальных напряжений в земляном полотне от действия статической нагрузки сопоставлен с уровнем напряжений, полученным в результате натурных измерений учеными Г.М. Шахунянцем, Я.Л.Коганом, М.Ф.Вериго, Г.Г. Коншиным, И.В.Прокудиным, В.В. Пупатенко, Г.М. Стояновичем и др. Максимальные напряжения под подошвой шпалы в сечениях приложения нагрузки составляют вертикальные σ_z - до 132 кПа, горизонтальные σ_x - до 48 кПа.

Затухание напряжений в верхней части земляного полотна происходит более интенсивно, чем в грунтах, расположенных ниже 0,64 м. На глубине 3 м напряжения σ_z затухают до 12 кПа, σ_x - до 0,5 кПа.

На рисунке 10 приведено распределение упругих вертикальных и горизонтальных перемещений грунта земляного полотна от действия статической нагрузки.

а) Шаг изолиний 0.2 мм



б) Шаг изолиний 0.1 мм

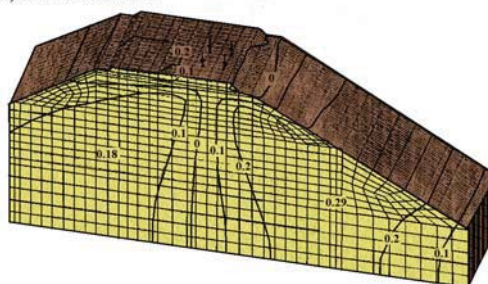


Рисунок 10. – Распределение упругих: а) вертикальных и б) горизонтальных перемещений грунта земляного полотна от действия статической нагрузки, мм

Изолинии упругих вертикальных перемещений (рисунок 10 а), сосредоточенные вокруг тележки, плавно расходятся вглубь и по поверхности насыпи. Максимальная величина упругих вертикальных перемещений зарегистрирована в местах приложения нагрузки и составляет под шпалой 2,1 мм. Сравнивая с величиной допускаемой упругой деформации, расчетная величина соответствует норме /5/. В основании насыпи упругая осадка 0,3 мм не превышает величину допустимой осадки $[S_y]=2$ мм /4/.

Изолинии упругих горизонтальных перемещений (рисунок 10 б) равномерно распространяются по телу насыпи и его основанию. Линия нулевых упругих горизонтальных деформаций проходит по оси пути и на уровне основной площадки. В верхней части насыпи наблюдаются сжимающие упругие деформации, направленные к оси пути и достигающие до 0,2 мм. Под основной площадкой происходит растяжение земляного полотна в стороны расположения откосов. Горизонтальные растягивающие перемещения не превышают 0,29 мм в правом откосе насыпи.

Вывод: таким образом, сформирована статическая расчетная модель земляного полотна. Напряженно-деформированное состояние модели насыпи от статической нагрузки сопоставимо с результатами исследований, проведенных учеными Прокудиным, В.В. Пупатенко, Г.М. Стояновичем и др. Новая статическая расчетная модель железнодорожного земляного полотна при выполнении расчетов дает правильные результаты и может применяться в качестве основы для формирования динамической модели земляного полотна, учитывающей сезонные особенности вибродинамического воздействия поездов на грунты.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОАО РЖД. Департамент пути и сооружений. ЦПИ - 36. Руководство по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтов земляного полотна. ВНИИЖТ. - М.-2005.-84 с.
2. Фадеев А.Б., Кудрявцев С.А., Бакенов Х.З. Решение задач механики грунтов, оснований и фундаментов методом конечных элементов с использованием ЕС ЭВМ. ХаБииЖТ. Хабаровск, 1989.- 42 с.
3. Курбацкий Е.Н., Курнавин С.А. Оценка параметров колебаний грунтового массива вблизи тоннелей мелкого заложения и наземных железнодорожных трасс. - Тезисы доклада 1-ой международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы развития ж.-д. транспорта", Москва, 18-21 апреля, 1994.
4. Курбацкий Е.Н. Реализация дискретного преобразования Фурье при решении краевых задач теории упругости. - Моск. ин-т инж. ж.-д. трансп. - М. - 1987 - 7 стр. - Деп. в ВИНТИ 13.04.87, № 3267-B87.
5. Отчет: Инструментальная оценка эффективности виброзащитной конструкции пути, уложенной на опытном участке соединительной ветки в депо «Красная Пресня». М., Экологический фонд развития городской среды «Экогород», 2002.