



Исаков Александр Леонидович родился в 1948 г. В 1971 г. окончил Новосибирский государственный университет. В 1975 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в 1986 — доктора технических наук. В настоящее время заведующий кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, профессор.

Сфера научных интересов — проблемы диагностики и расчета земляного полотна, проблемы вибродиагностики дефектности колесных пар подвижного состава в процессе его движения.

Автор более 50 научных статей и более 30 изобретений.

УДК 625.12:681.518.54

А.Л. ИСАКОВ

ГЛУБОКАЯ ДИАГНОСТИКА ВЫСОКИХ НАСЫПЕЙ

В статье представлен метод глубокой диагностики земляного полотна, позволяющий дать анализ его состояния и поведения при поездных нагрузках, а кроме того, выбрать наиболее эффективный вариант его лечения.

Проблема диагностики и выявления причин потери устойчивости и стабильности грунтовых сооружений большой высоты, несмотря на использование современных средств, таких как георадиолокация, сейсмоакустика, электродинамическое зондирование и т. д., до сих пор не имеет окончательного решения, в полной мере удовлетворяющего практиков.

На протяжении последних лет в СГУПС на кафедре «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» успешно разрабатывается новый подход к решению данной проблемы, смысл которого состоит в создании замкнутой системы диагностики и расчета земляного полотна с выработкой алгоритма реализуемых на ЭВМ рекомендаций по его усилению.

Предлагаемый метод глубокой диагностики земляного полотна позволяет не только «заглянуть» в толщу насыпи на глубину более 20 м, дать «компьютерный диагноз» ее состояния и поведения при поездных нагрузках, но и выбрать наиболее эффективный вариант ее лечения в сложных ситуациях.

Чтобы детально изучить структуру земляного полотна, на железных дорогах обычно бурят десятки скважин, здесь этот трудоемкий процесс сводится лишь к контрольному бурению для корректировки расчетных характеристик грунта в зонах однородности грунта объемной геомодели.

Построенная на компьютере объемная геомодель позволяет увидеть не только строгую дифференциацию грунта в теле земляного полотна по физико-механическим характеристикам, но и очертание зон разуплотнения, повышенной влажности, мерзлоты и т. д.

Суть глубокой диагностики заключается в детальном анализе напряженно-деформированного состояния земляного полотна, проводимом на базе объемной геомодели, отражающей реальное состояние слагающих его грунтов и их особенностей.

Последовательность этапов выполнения работ по методу глубокой диагностики выглядит следующим образом.

1. Сейсмоакустическое обследование проблемного участка земляного полотна с построением сейсмотограмм по продольным V_p и поперечным V_s скоростям упругих волн.

2. Определение основных физико-механических характеристик грунта тела насыпи и ее основания в выделенных на сейсмотограммах зонах однородности с их последующим уточнением путем контрольного бурения или зондирования.

3. Построение объемной геомодели обследуемого участка земляного полотна по данным сейсмотографии.

4. Трехмерный компьютерный анализ напряженно-деформированного состояния земляного полотна.

5. Выработка и расчетное обоснование вариантов лечения земляного полотна с компьютерной проверкой их эффективности.

Сейсмотомография

Целевым назначением сейсмотомографии земляного полотна является детальное изучение состояния грунтов на обследуемом участке земляного полотна по результатам геофизических исследований с последующей оценкой физико-механических характеристик грунтов, глубины залегания коренных пород и уровня грунтовых вод (рис. 1).

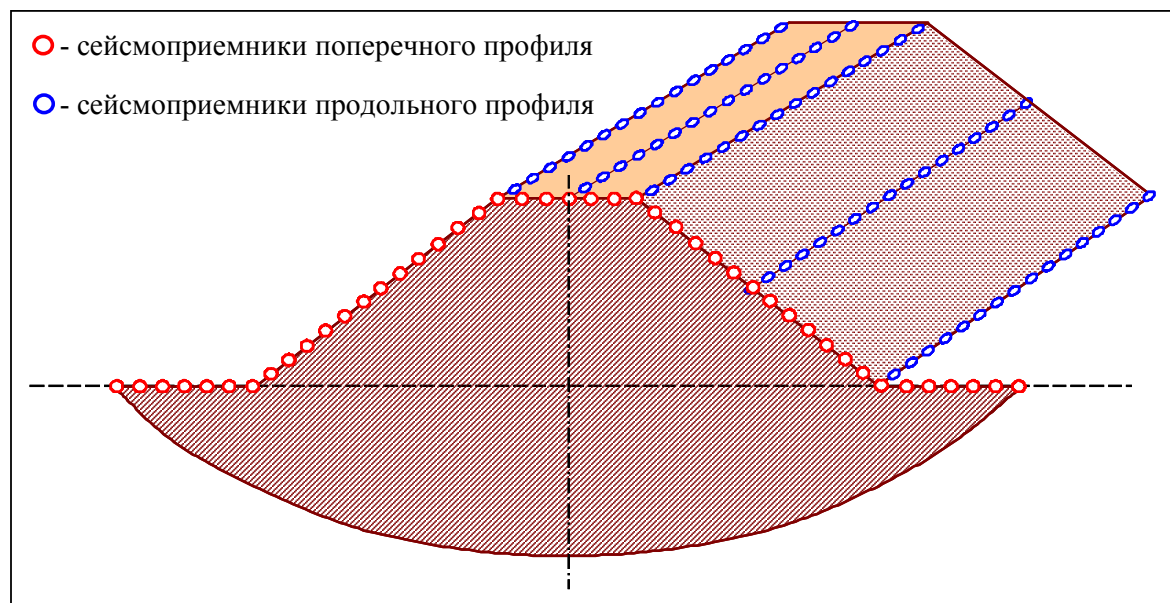


Рис. 1. Схема размещения сейсмоприемников при сейсмотомографическом обследовании

Первичным результатом сейсмотомографической обработки являются плоскостные срезы полей скоростей распространения продольных V_p и поперечных V_s волн в земляном полотне, которые используются для предварительной идентификации грунтов и определения зон их однородности [1]. Далее с помощью специальных корреляционных зависимостей выполняется построение томографических срезов по отдельным физико-механическим параметрам грунтов — E , ν , ρ , C и ϕ (рис. 2–4).

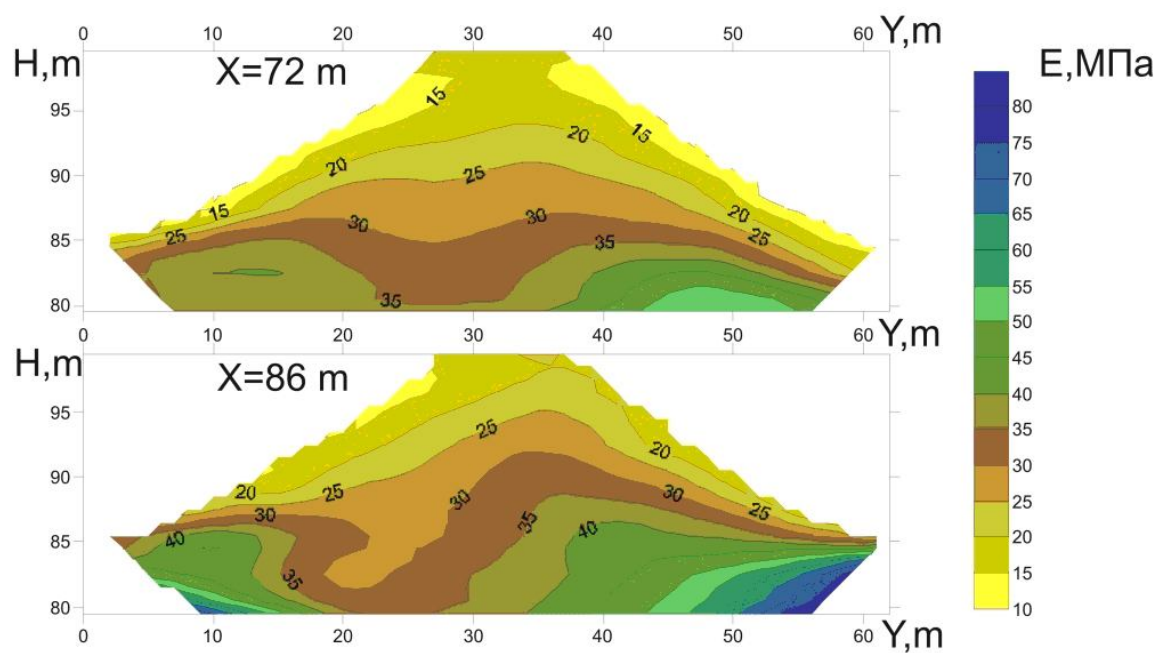


Рис. 2. Поперечный профиль томограммы модуля упругости грунтов насыпи

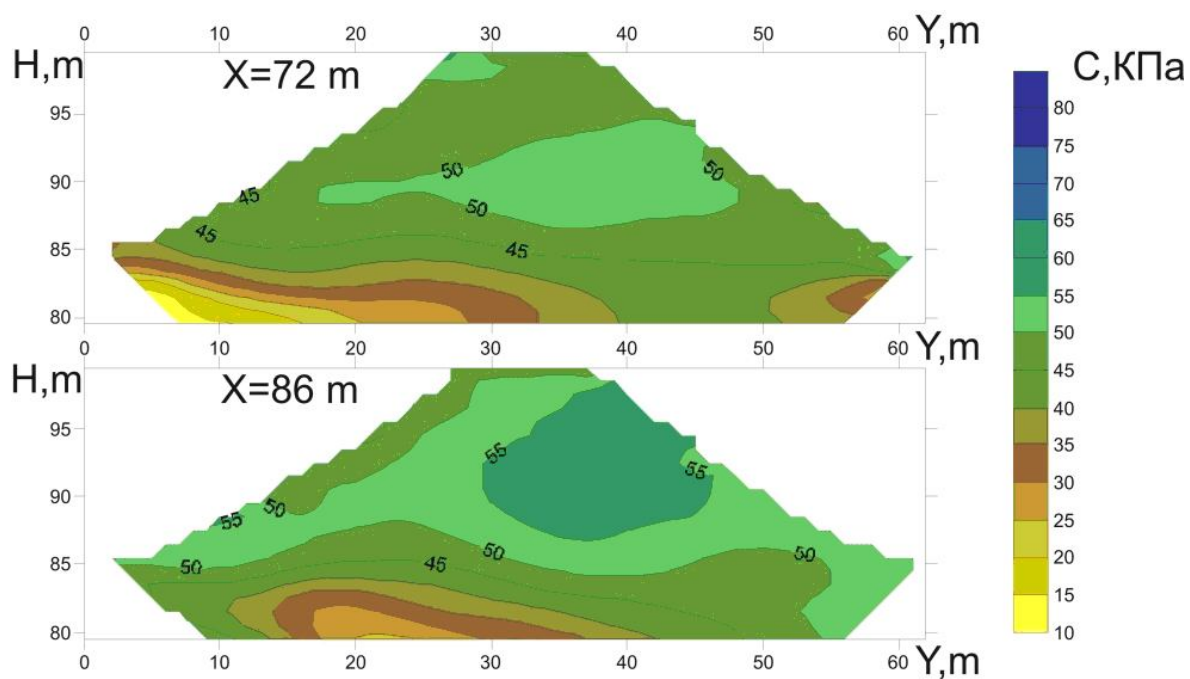


Рис. 3. Томограмма поперечного профиля удельного сцепления грунтов насыпи

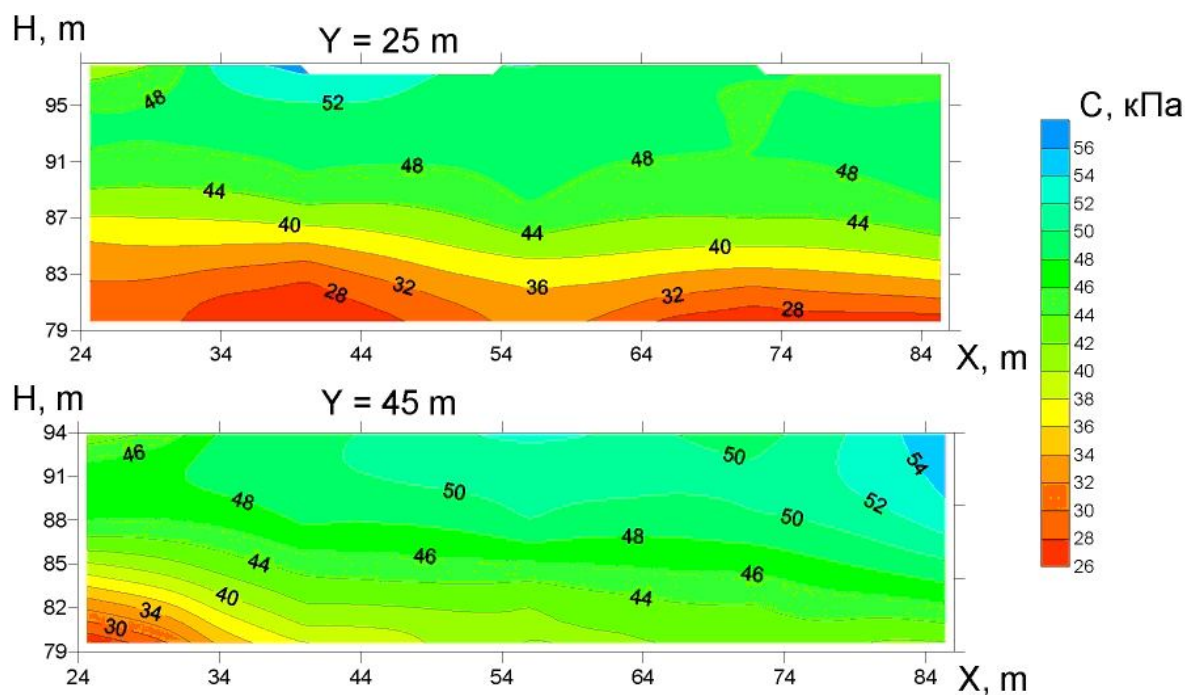


Рис. 4. Томограмма продольного профиля удельного сцепления грунтов насыпи

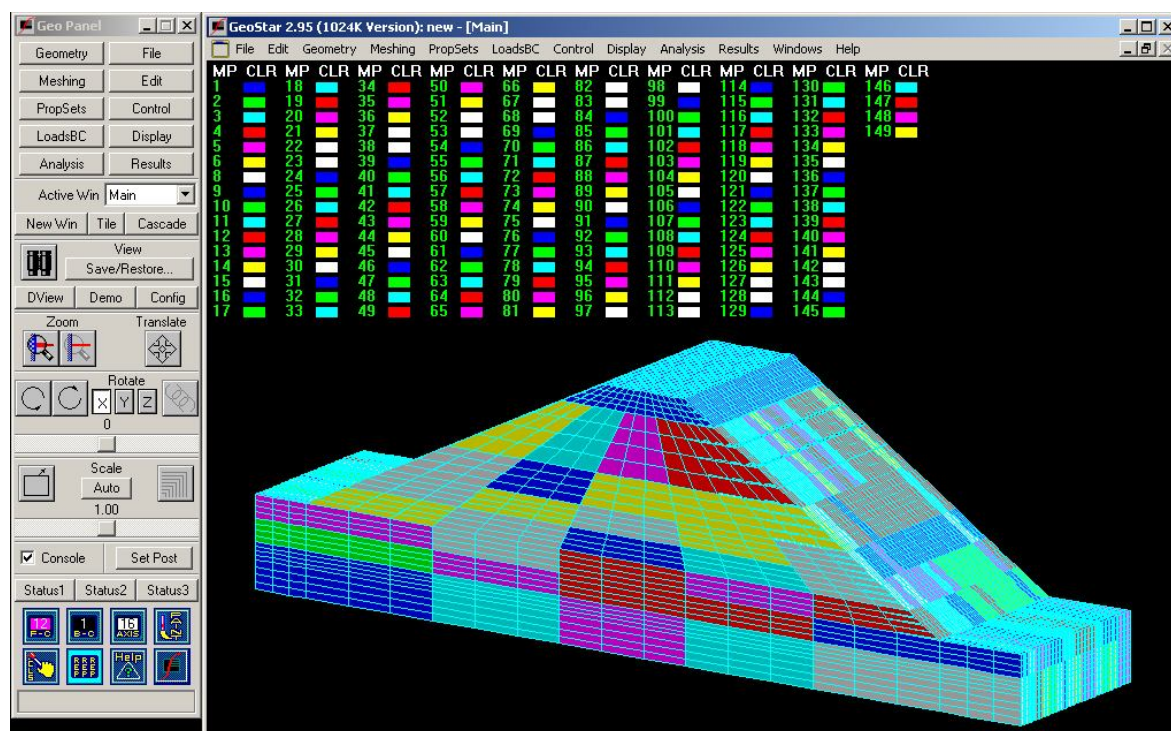


Рис. 5. Фрагмент объемной геомодели насыпи

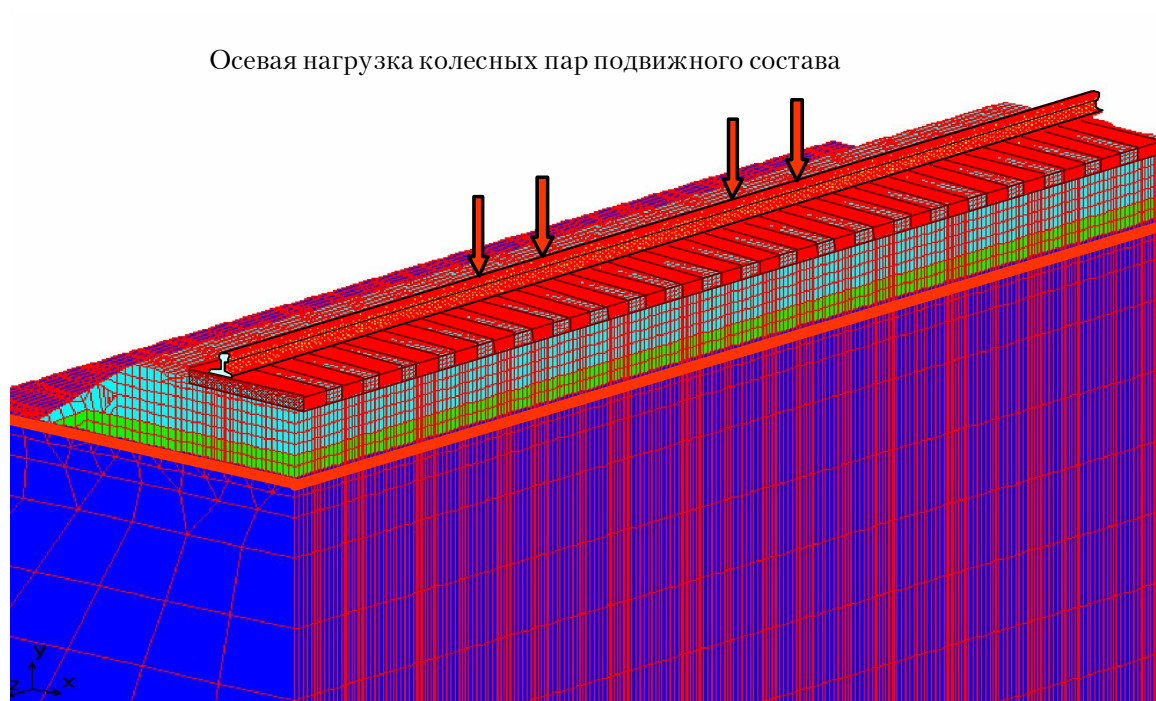


Рис. 6. Общий вид конечноэлементной модели железнодорожного пути

Геомодель

По результатам сейсмотомографии и геодезической съемки строится объемная геомодель проблемного участка земляного полотна, дополненная указанием границ выхода коренных пород и уровня залегания грунтовых вод. Работа по построению геомодели выполняется конечноэлементным методом, где каждому элементу модели придаются свойства грунта в соответствии с данными сейсмотомографии, откорректированными по результатам контрольного бурения. На рис. 5 показан фрагмент геомодели насыпи высотой 14 м с зонами идентичности физико-механических характеристик грунта.

Компьютерный анализ

Ключевым этапом глубокой диагностики земляного полотна является компьютерный анализ обследуемого участка с использованием трехмерной математической модели (рис. 6) [2, 3], где в качестве исходных данных используется построенная на базе сейсмотомограмм геомодель. Для упрощения энергоемких вычислений иногда представляется целесообразным осевую нагрузку на рельсы в модели заменять распределенным по подошве шпал давлением так, как это показано на рис. 7. Здесь приведен упрощенный вариант распределения давления, передаваемого от железобетонной шпалы на балласт.

Разработанная математическая модель ориентирована на исследование сложных процессов и явлений, происходящих в земляном полотне при движении поезда, в зонах с существенно трехмерной картиной деформирования грунта.

В качестве иллюстрации можно привести пример расчета напряженно-деформированного состояния пути в окрестности головной части поезда как наиболее проблемной по градиенту изменения поездной нагрузки вдоль оси пути [4]. На рис. 8 показан характер деформирования грунта и балластного материала при прохождении первой секции локомотива ВЛ-15. Кроме анализа

статической картины, данная расчетная схема позволяет рассмотреть так называемую квазистатику — безволновую динамику изменения напряженно-деформированного состояния грунта и балластного материала под действием поездной нагрузки. Если принять скорость движения локомотива постоянной и равной, например 80 км/ч, то, используя расчетные зависимости на рис. 8, можно путем деления линейного масштаба по оси OX на скорость движения локомотива V_n , получить функцию изменения вертикальных перемещений грунта от времени ($t = L / V_n$) при прохождении поезда (рис. 9). Тогда двойное дифференцирование полученной функции по t даст зависимость изменения вертикальных ускорений частиц грунта от времени. Здесь следует еще раз подчеркнуть, что речь идет только о низкочастотной динамике колебаний земляного полотна, вызванной чередованием нагрузок на путь при прохождении осевых пар через фиксированное поперечное сечение земляного полотна.

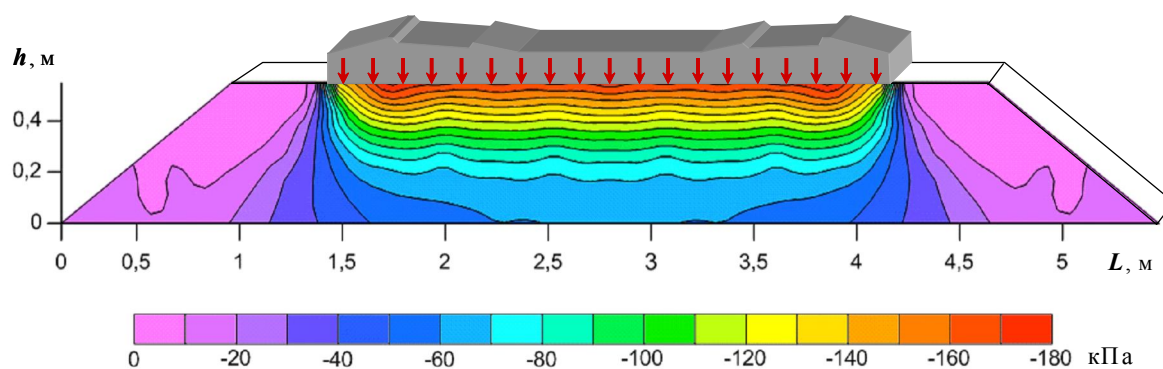


Рис. 7. Изолинии вертикальных напряжений в балластной призме под колесной парой при равномерном распределении нагрузки (модель Друкера — Прагера)

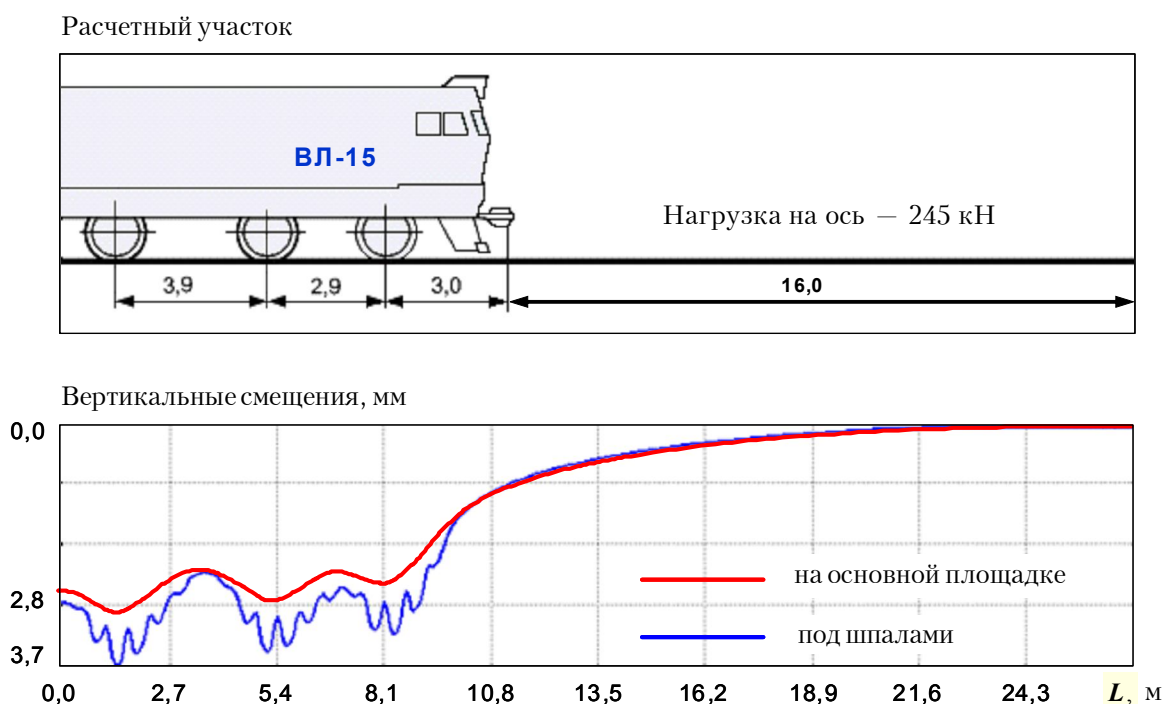


Рис. 8. Вертикальные смещения пути в окрестности головной части поезда

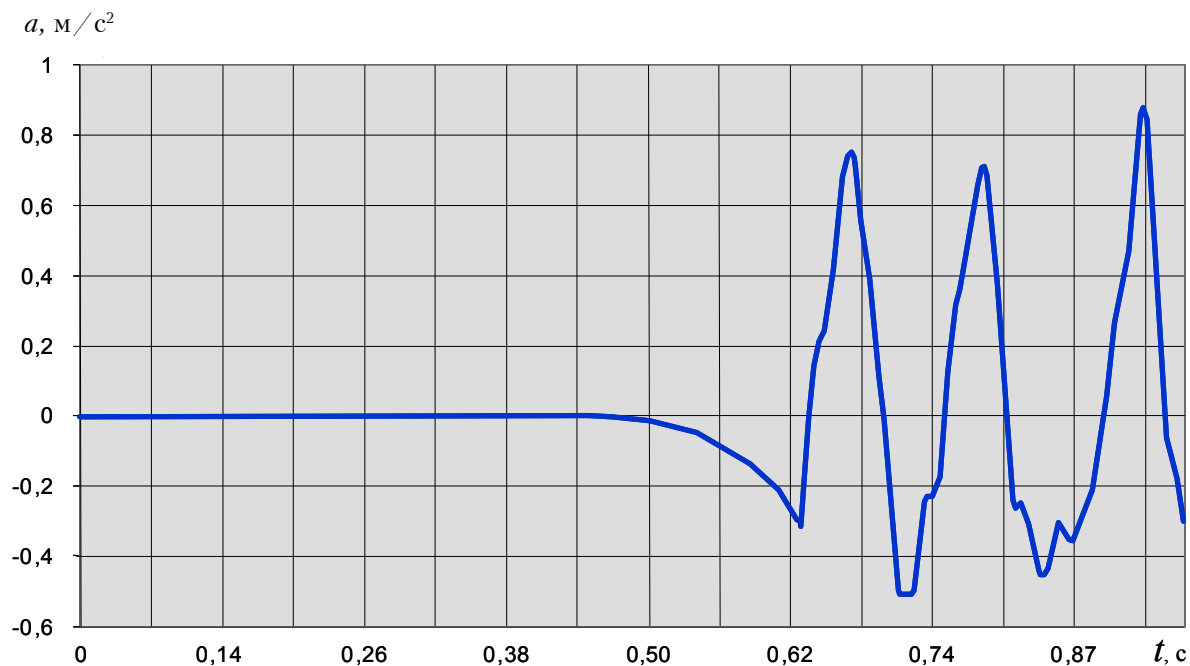


Рис. 9. Изменение вертикальных ускорений грунта на основной площадке при прохождении первых трех колесных пар локомотива

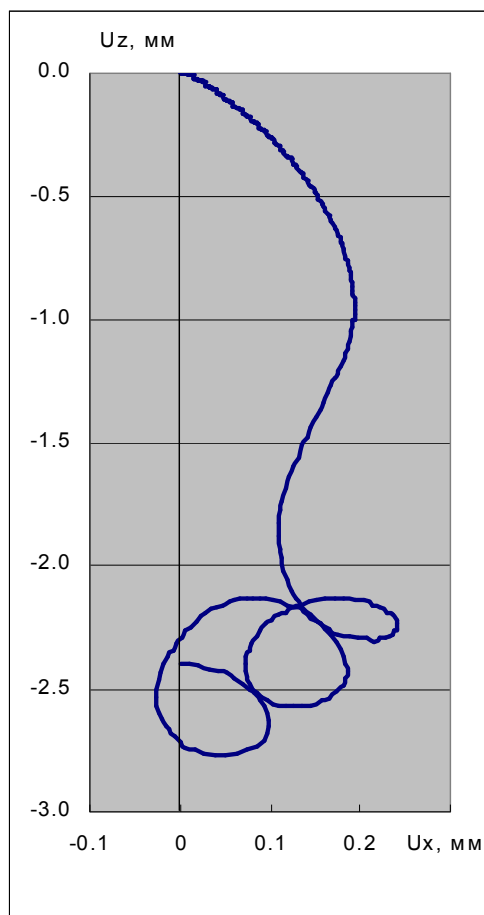


Рис. 10. Траектория частиц грунта основной площадки при прохождении первых трех колесных пар локомотива

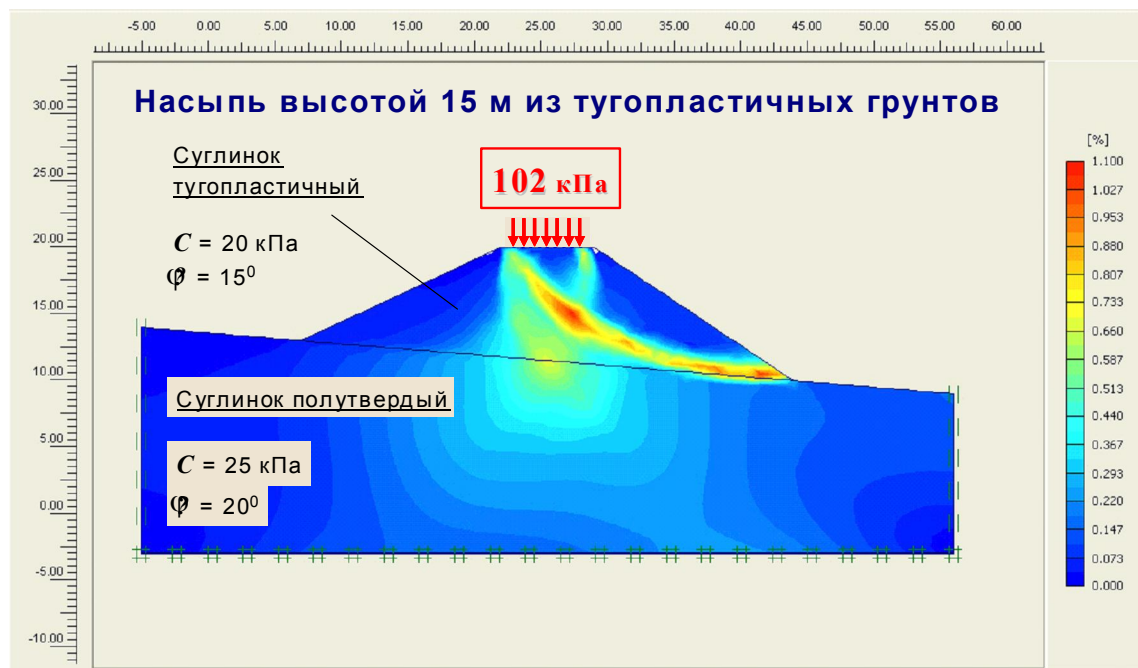


Рис. 11. Интенсивность сдвиговых деформаций в теле земляного полотна при критической поездной нагрузке

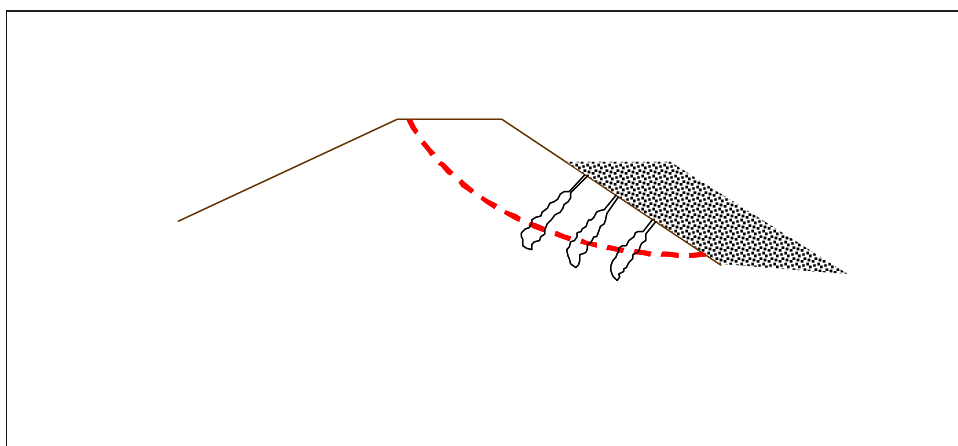


Рис. 12. Расчетные варианты укрепления насыпи

Построенная математическая модель позволяет увидеть еще одну ранее не исследовавшуюся особенность деформирования земляного полотна. Это траектории частиц грунта при прохождении поезда. На рис. 10 в координатах U_x — перемещения вдоль оси пути и U_z — вертикальные перемещения, показан вид траектории частицы грунта, находящейся на основной площадке земляного полотна, при прохождении локомотива (см. рис. 8).

Завершающей стадией компьютерного анализа состояния высоких насыпей является расчет поля сдвиговых деформаций грунта в теле земляного полотна. На рис. 11 приведен пример расчета насыпи на устойчивость в параметрах сдвиговых деформаций, где явно просматривается линия скольжения вдоль правого откоса при предельно допустимой нагрузке для данной конструкции земляного полотна и заданных характеристиках грунта. Компьютерный

анализ можно дополнить типовым расчетом определения традиционного коэффициента устойчивости вдоль найденной линии скольжения.

Варианты лечения земляного полотна

По результатам компьютерной диагностики состояния земляного полотна разрабатываются мероприятия по его лечению. Все возможные варианты отрабатываются на созданной модели, и выбирается наиболее эффективный и экономически выгодный способ устранения причин «болезни» земляного полотна.

Расчетный комплекс позволяет оценивать эффект от любых мероприятий по усилению откосов и изменению свойств грунтов земляного полотна, например, вследствие осушения дренажом, напорного инъектирования, силикатизации и т.д. [5].

На рис. 12 показаны два типовых варианта усиления земляного полотна — напорное инъектирование грунта и отсыпка контрбанкета, сравнительный расчет которых может быть проведен в рамках вышеописанной математической модели с целью определения наиболее эффективного и экономичного инженерного решения при проведении работ по укреплению проблемного участка земляного полотна.

Выводы

1. Отличительные особенности предложенного метода глубокой диагностики заключаются в следующем:

- во-первых, это построение и использование объемной геомодели обследуемого участка земляного полотна с реальной разбивкой грунтового массива на отдельные зоны по физико-механическим характеристикам грунтов;
- во-вторых, использование для анализа состояния земляного полотна трехмерной математической модели с реальным распределением осевых нагрузок подвижного состава на земляное полотно;
- в-третьих, использование в математической модели деформационного подхода к прогнозированию потенциально опасных ситуаций и определению возможных поверхностей смещения грунта вдоль «слабых откосов».

2. Вышеописанная схема проведения глубокой диагностики дает возможность оценивать эксплуатационные параметры земляного полотна при высокой степени дифференцируемости свойств грунта, в отличие от используемого в настоящее время усредненного подхода к описанию структуры тела насыпи и его основания. Детальный учет физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в расчетных схемах по оценке его состояния ведет к снижению эксплуатационных расходов на содержание земляного полотна и является гарантией предотвращения возможных аварийных ситуаций, связанных с потерей его эксплуатационной надежности.

3. Возможность оперативного анализа эффекта от применения различных технологий и материалов при строительстве и ремонте земляного полотна определяет направление экономии материальных средств и трудовых ресурсов. Если целевой функцией при проектировании является не минимизация затрат, а повышение безопасности движения, то и в этом случае оптимизация проектных решений может быть оперативно обеспечена путем использования предложенного подхода.

Литература

1. *Мальцев А.И., Канарейкин Б.А.* Сейсмическая томография при исследовании грунтов земляного полотна на примере участка Московской ж.д. Орел—Липецк // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири. Новосибирск: СГУПС, 2006.
2. *Трехмерная математическая модель деформирования земляного полотна / А.Л. Исаков, В.П. Машуков, С.П. Васильев, Д.А. Корнеев* // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири. Новосибирск: СГУПС, 2005.
3. *Исаков А.Л., Корнеев Д.А.* Расчет напряженно-деформированного состояния земляного полотна при воздействии поездной нагрузки // Тр. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. М.: МИИТ, 2005.
4. *Исаков А.Л., Машуков В.П., Корнеев Д.А.* Анализ распределения напряжений и деформаций в балластной призме и земляном полотне в окрестности головной части движущегося поезда // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири. Новосибирск: СГУПС, 2006.
5. *Исаков А.Л., Крицкий М.Я., Мальцев А.И.* Обеспечение эксплуатационной надежности высоких насыпей на основе их глубокой диагностики // Тр. науч.-практ. конф. «Перспективы технического развития комплекса ОАО «РЖД» в условиях его реформирования». М., 2007.