

**Л.М. Тимофеева, Е.С. Краснов**

Пермский государственный технический университет

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

*Рассмотрено развитие теории динамического воздействия автомобиля на основание земляного полотна. Произведен анализ исследований поведения слабого основания, сложенного текучими и текучепластичными суглинками, при строительстве автомобильной дороги «Южный обход г. Перми».*

**Ключевые слова:** слабое основание, земляное полотно, несущая способность, автомобильная дорога.

Опыт строительства и эксплуатации автомобильных дорог федерального значения с высокой интенсивностью движения показывает необходимость учета динамических воздействий на грунты основания земляного полотна. Недоучет динамических воздействий на устойчивость слабых грунтов основания в ряде случаев приводит к деформациям – искажениям продольного и поперечного профиля как в процессе строительства дорог, так и в процессе эксплуатации, даже в случаях применения специальных методов повышения устойчивости оснований.

В процессе проектирования наличие слабых грунтов учитывается главным образом при конструировании и расчете земляного полотна и его основания. При этом к дорожной конструкции предъявляется ряд требований, определяющих выбор конструктивных, технологических решений и расчетных схем. Основание полотна должно быть устойчивым, без образования выдавливания слабого грунта из-под подошвы насыпи. Осадки насыпи в период эксплуатации не должны вызвать недопустимых искажений продольного и поперечного профиля, а упругие прогибы и колебания конструкции от статического и динамического воздействия транспортных нагрузок по амплитуде и частоте должны быть ограничены условиями длительной прочности дорожной одежды [1].

Вышеуказанные требования определяют основные критерии расчета дорожной конструкции со слоем слабого грунта в основании зем-

ляного полотна. В стандартных условиях выполнение этих требований обеспечивается без каких-либо дополнительных мероприятий и специальных расчетов за исключением существующей методики динамического расчета земляного полотна для случаев залегания в основании земляного полотна торфа и при высоте насыпи менее 3 м [3].

Особенностью проектирования земляного полотна на слабых грунтах является необходимость учета изменения их механических свойств в процессе консолидации. Однотипная конструкция может работать по-разному, если различны, например, сроки строительства или применяемое технологическое оборудование, а появление деформаций характерно не только для периода строительства, но и для процесса эксплуатации дороги [1]. Поэтому разработать типовые конструкции для каждого конкретного случая прохождения дороги через участки со слабым основанием невозможно, и их относят к участкам индивидуального проектирования.

Существующие в настоящее время способы перехода через участки со слабым основанием сводятся в основном к мероприятиям по повышению его сопротивляемости деформированию от внешних нагрузок.

Разработкой динамических методов расчета земляного полотна первыми стали заниматься специалисты железнодорожного строительства. К.С. Ордуянц считал, что на величину упругого прогиба оказывает влияние только толщина насыпного слоя и установил минимум толщины насыпи 4 м независимо от мощности слабого грунта в основании. Позднее Н.Н. Сидоров пришел к выводу о необходимости учета как толщины насыпи, так и мощности слабого слоя в основании.

Развитие теории динамического воздействия автомобиля с дорогой дало возможность предложить более строгие решения задачи динамического воздействия автомобиля на основание земляного полотна (И.Е. Евгеньев, В.М. Сегеркранц, А.С. Королев, М.П. Болштынский, М.М. Танклевский). Было установлено, что характер динамической работы земляного полотна на слабых грунтах определяется в первую очередь толщиной насыпи и что при определенных значениях толщины специфические упругие прогибы дорожной конструкции не оказывают влияния на ее длительную прочность [1].

В наиболее полном виде задача учета транспортной нагрузки при назначении минимальной толщины насыпи была решена В.Н. Яромко (БелдорНИИ). Решение предусматривает совместный расчет прочности слоев дорожной конструкции на статическое воздействие автомобиля –

по общепринятой схеме предельного равновесия на сдвиг в подстилающем грунте и растягивающие напряжения при изгибе слоев покрытия, а также на динамическое воздействие по схеме затухающих колебаний – «на вибропрочность» [1].

При динамическом расчете система насыпь – слабое основание принимается эквивалентной системой с одной степенью свободы с затуханием колебаний, пропорциональным их скорости. Правомерность такой интерпретации обеспечивается при условии равенства кинетических энергий при колебательных движениях, которое выражается совпадением частоты собственных колебаний модели и реальной системы, фактически имеющей бесконечное число степеней свободы. Упруго-вязкие элементы модели, обуславливающие затухание процесса, выражаются в соответствии с гипотезой Фойгта через коэффициент демпфирования.

Инерционность слабого основания учитывается введением присоединенной массы.

При интерпретации колебаний принимается, что они имеют гармонический характер, и преобладающая часть их энергии ограничивается низшей частотой собственных колебаний системы. Нагрузка от колеса автомобиля выражена функцией импульса «типовой сигнал», описанной В.Н. Глаговским.

Натурные наблюдения, проведенные на существующих насыпях на торфяном основании мощностью 2–6 м с осциллографической записью колебаний, подтвердили возможность использования данной модели для описания процесса колебаний при прохождении автомобиля. В частности было выявлено, что инерционные силы не оказывают значительного влияния на параметры процесса.

Анализ результатов полевых и лабораторных испытаний показал сложный характер взаимодействия транспортных нагрузок с дорожной конструкцией, включая основание. При малой высоте насыпи  $H_n$  транспортные нагрузки вызывают колебания грунтов земляного полотна и основания, значительно снижая сопротивление сдвигу. Для учета динамического характера подвижной нагрузки на дорожную одежду, земляное полотно и основание автомобильных дорог вводятся соответствующие эмпирические коэффициенты надежности.

При большой высоте  $H_n$  динамические воздействия практически не оказывают влияния на устойчивость, и при расчетах устойчивости рассматривается квазистатическое напряженное состояние основания.

Определяется давление по подошве земляного полотна с учетом транспортных нагрузок по известным методикам (И.З. Лобанова, СоюздорНИИ) и полученная величина сопоставляется с «безопасным» давлением, представляющим собой прочность основания с учетом коэффициентов надежности. Устойчивость слабого основания считается обеспеченной, если отношение  $p_{\text{без}} / p_p > 1,0$  ( $p_{\text{без}}$  – безопасная нагрузка, т.е. нагрузка, соответствующая устойчивому основанию;  $p_p$  – расчетное давление по подошве насыпи).

Экспериментальными исследованиями [2] установлено, что для торфяников пограничное значение высоты насыпи  $H_{\text{нкр}} = 3,0$  м. При  $H_{\text{н}} < 3,0$  м и  $p_{\text{без}} / p_p \leq 1,0$  необходимо проводить динамический расчет земляного полотна [3] с учетом усталостной прочности слабого грунта. Однако по данным исследований, проведенных авторами,  $H_{\text{нкр}}$  может изменяться от 1,5 до 4,0 м в зависимости от параметров насыпи и режима ее возведения. Установлено, что наибольшее влияние на устойчивость и деформации слабого основания оказывает построечный транспорт. При этом влияние тем больше, чем меньше толщина укладываемого слоя и величина «отдыха» грунта. Опыт показывает, что в зависимости от вида грунта насыпного слоя и основания при толщине слоя 0,40–1,0 м совместное действие его собственного веса и транспортной нагрузки оказывается ниже предельной нагрузки на основание и приводит практически только к его уплотнению.

Совместно с сотрудниками ОАО «Пермдорстрой» были проведены исследования поведения слабого основания, сложенного текучими и текучепластичными суглинками, при строительстве автомобильной дороги «Южный обход г. Перми». Для уплотнения основания и повышения его несущей способности использовался метод предварительной консолидации пригрузкой. На рис. 1 показаны реальные кривые осадки основания (наблюдаемой и расчетной по методу Н.Н. Маслова).

Осадки основания в различных точках по оси земляного полотна определялись по специальным маркам, заложенным в уровне кровли основания после срезки растительного слоя. Укладка насыпного грунта проводилась захватками с временными интервалами («отдыхом») между слоями от 2 до 6 месяцев. Для определения физико-механических характеристик земляного полотна и уплотненного основания после возведения насыпи на полную высоту, стабилизации осадок и срезки пригрузочного слоя отбирались образцы грунта с разных глубин. Полученные осредненные значения параметров грунтов приведены в таблице.

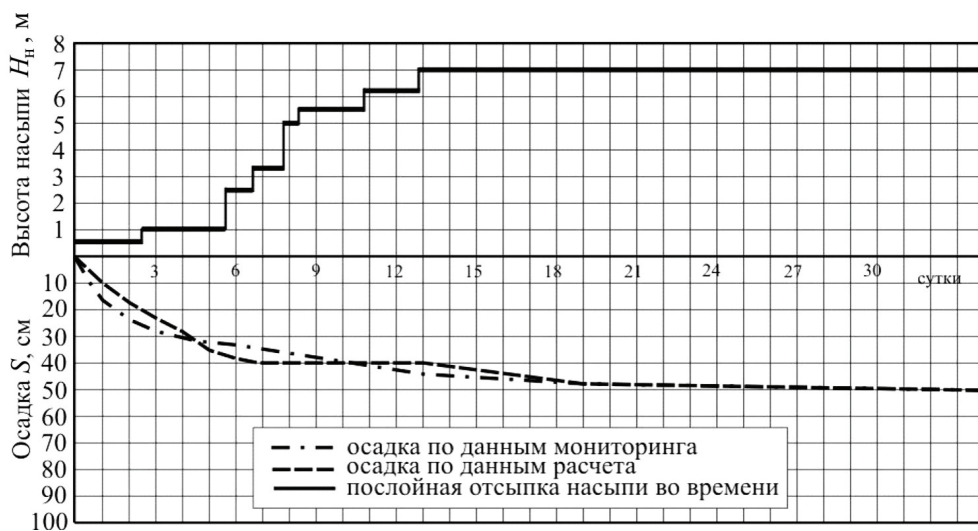


Рис. 1. Графики осадки (проектной и наблюдаемой) слабого основания

### Расчетные параметры грунтов основания в естественном состоянии и с учетом уплотнения

Вид грунта	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Показатель текучести $I_L$	Коэффициент пористости $e$	Прочностные характеристики		Модуль деформации $E$ , МПа
				$\varphi$ , град	$C$ , кПа	
Суглинок текуче-пластичный (до уплотнения)	1,88	0,78	1,078	12	18	3,4
Суглинок мягко-пластичный (после уплотнения)	1,98	0,64	0,978	14	26	5,2

На основе полученных данных были проведены динамические и статические расчеты земляного полотна на слабом основании с учетом рекомендаций [3]. Расчет проводился по трем условиям:

- 1) ускорения колебаний насыпи и дорожной одежды не должны превышать допустимых величин для данного типа покрытия ( $a_p \leq a_u$ );
- 2) прогибы дорожной одежды не должны превышать предельно допустимых величин  $f_p \leq f_u$ ;
- 3) должно выполняться условие прочности слабого основания с учетом длительности действия транспортных нагрузок.

Расчетная схема представлена на рис. 2.

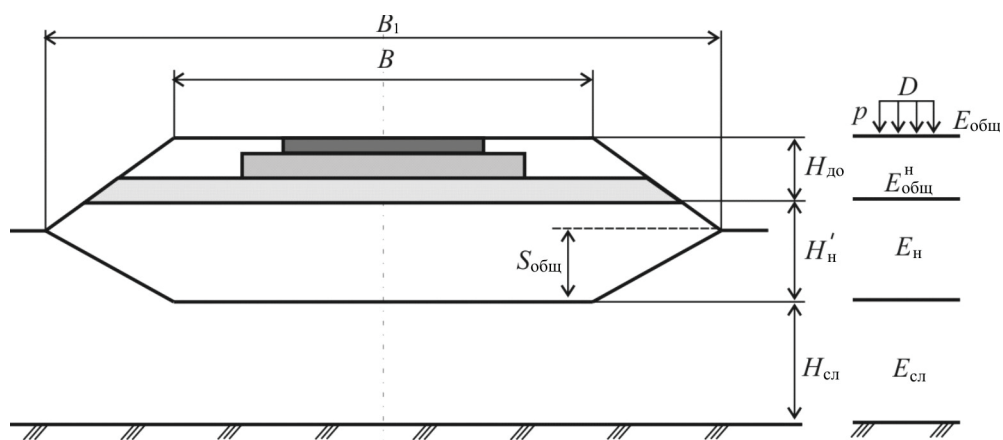


Рис. 2. Расчетная схема

Расчет проводился при следующих данных: высота насыпи  $H_n = 1,5$  м (было принято минимальное значение); мощность слабого основания  $H_{сл} = 4,0$  м;  $E_n = 30,0$  МПа, коэффициент демпфирования  $\psi = 0,11$ , упругий прогиб  $l = 0,88$  мм для  $p = 0,6$  МПа, динамический коэффициент  $K_d = 1,3$ ; амплитуда колебаний  $A = 0,264$  мм; ускорение колебаний  $a_p = 0,7$  мм/с<sup>2</sup> <  $a_u = 20$  мм/с<sup>2</sup>. Следовательно, для дорожного покрытия динамические воздействия не опасны.

При малых габаритах дороги и относительно небольших размерах земляного полотна используемая в пособии [3] расчетная схема может быть применена для динамических расчетов невысоких насыпей. Однако при современных габаритах федеральных дорог ее применение может приводить к значительным ошибкам.

Особое значение имеют вопросы консолидации переувлажненных глинистых грунтов при многократных воздействиях с учетом интенсивности движения, длительности и скорости нагружения. Для железнодорожного транспорта эта проблема наиболее полно была исследована М.Н. Гольдштейном и Л.С. Лapidусом [4], установившими зависимости упругого модуля и усталостной прочности грунтов от скорости приложения и характера изменения пульсационных нагрузок. Для учета динамического характера подвижной нагрузки на дорожную одежду, земляное полотно и основание ими было предложено вводить соответствующие эмпирические коэффициенты надежности, установленные при натуральных и лабораторных экспериментах. Выяснилось, что при пульсационных нагрузках длительного действия происходит усталостное разрушение грунта земляного полотна. С учетом этих рекомендаций были проведены расчеты устойчивости основания на рассматриваемом участ-

ке дороги. Давление по кровле уплотненного суглинка от собственного веса грунта и построечного транспорта составило  $p_c = 0,06$  МПа, предельное давление с учетом динамики  $p_{без} = 0,04$  МПа ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $C = 15$  кПа), т.е. следует ожидать потери устойчивости и выпора грунта из-под подошвы насыпи.

В реальных условиях поведение слабого основания, в том числе уплотненного предварительной пригрузкой, при прохождении построечного и эксплуатационного транспорта практически не исследовано. Поэтому авторами были проведены лабораторные испытания в лотке для получения качественной картины разрушения слабого армированного и неармированного основания при пульсационных нагрузках, имитирующих удары колес при движении автотранспорта. Пульсационная нагрузка создавалась площадным вибратором, установленным на поверхность водонасыщенного недоуплотненного легкого суглинка текучепластичной консистенции ( $I_L = 0,75$ ) нарушенной структуры. Вибратор включался и выключался через равные промежутки времени (5 мин). Выяснилось, что неармированное основание практически сразу разрушалось из-за сдвиговых деформаций с погружением нагруженной площадки в грунт. В случае армированного основания происходило уплотнение грунта под армированной конструкцией и развитие осадки с образованием упругого и остаточного прогиба армирующих элементов. Проведенные эксперименты подтвердили, что армирование кровли слабого основания повышает его несущую способность, однако для моделирования работы основания земляного полотна при динамических воздействиях транспортных нагрузок необходимы детальные не только качественные, но и количественные исследования.

Для изучения влияния динамики на устойчивость слабого основания при движении построечного транспорта в реальных условиях были обследованы участки автомобильной дороги «Южный обход г. Перми» с высотой насыпи 0,75–1,5 м после возведения земляного полотна (до укладки дорожной одежды). Было установлено, что идут локальные подвижки грунта основания за пределами подошвы насыпи и развиваются неравномерные осадки земляного полотна. В связи с тем, что земляное полотно было уже возведено, были предложены методы усиления основания с помощью пригрузочных берм с использованием армогрунтовых конструкций.

В настоящее время наблюдаются волнообразные деформации дорожного покрытия, связанные с осадками основания. Чтобы оценить

влияние динамического воздействия автотранспорта на слабые глинистые грунты с учетом технологических факторов необходимо провести специальные натурные исследования на выделенном для этих целей участке реальной строящейся дороги на слабом основании.

### **Список литературы**

1. Цытович Н.А. Механика грунтов: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

2. Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Транспорт, 1976. – 271 с.

3. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах / Росавтодор. – М., 2004. – 252 с.

4. Лapidус Л.С. Несущая способность основной площадки железнодорожного земляного полотна. – М.: Транспорт, 1978. – 125 с.

Получено 18.03.2011