

*Черныш А.С., канд. техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

gkadastr@mail.ru

Вибродинамические воздействия являются основной причиной потери устойчивости откосов земляных и грунтовых насыпей. При воздействии вибраций происходит снижение прочностных характеристик грунта - угла внутреннего трения (φ) и удельного сцепления (c). Величина снижения характеристик зависит от ряда факторов, таких как амплитуда и частота колебаний, влажности, плотности, напряженного состояния грунтов. Прогноз изменения прочностных характеристик является основой точного расчета устойчивости земляного полотна. Получение зависимостей изменения прочностных характеристик грунтов позволяет значительно повысить точность расчета устойчивости откосов земляных насыпей.

Ключевые слова: *Вибродинамические воздействия, угол внутреннего трения (φ), удельное сцепление (c), откос, устойчивости земляного полотна.*

Тиксотропные явления в глинистых грунтах в значительной степени зависят от влажности. Экспериментальные исследования показывают [1, 2] (для глин и суглинков), что при том уровне интенсивности вибродинамического воздействия, который передается железнодорожному земляному полотну высокоскоростных магистралей, максимальное значение прочностных характеристик регистрируется при естественной влажности в пределах от $W_p + 0,24I_p$ до $W_p + 0,36I_p$. Объясняется это тем, что при влажности грунта ниже названного диапазона силы взаимодействия минеральных частиц столь велики, что дополнительное вибродинамическое воздействие не в состоянии существенно повлиять на структурные связи в грунте.

Если влажность грунта выше $W_p + 0,36I_p$, то взаимодействие между частицами настолько ослаблено утолщенными водными пленками, что прочность грунта приближается к минимальному значению, и поэтому при воздействии вибродинамической нагрузки структурные связи почти не разрушаются.

Плотность также существенно влияет на прочность глинистых грунтов. Для грунтов железнодорожного полотна в соответствии с действующими техническими условиями она должна быть не менее $0,96\delta_{\max}$. При более высоких значениях влияния плотности на прочностные характеристики незначительно, и для практических целей его можно не учитывать.

Величина статической нагрузки грунта от балластной призмы и верхнего строения пути имеет наибольшие колебания, находясь в пределах от 0,11 до 0,14 кгс/см². При проведении экспериментов её можно принять постоянной и равной 0,14 кгс/см².

С некоторой условностью колебания грунта можно представить в виде двух гармоник: незначительной, изменяющейся в пределах от 5 до 75 Гц, и высокочастотной от 75 до 200 Гц. Низкочастотная обладает высокой амплитудой, с максимальной величиной от 160-180 мк, высокочастотная – малой амплитудой, 6-12 мк не оказывает заметного влияния на прочностные характеристики глин и суглинков. Следовательно, при проведении экспериментов и при оценке устойчивости полотна можно не учитывать влияние низкочастотной составляющей колебаний.

Ряд исследователей, в том числе [3] и [4], убедительно показывают, что при амплитуде колебаний до 160-180 мк изменения частоты в пределах от 5 до 75 Гц не оказывает существенного влияния на снижение прочностных характеристик глинистых грунтов.

При выявлении влияния вибродинамического воздействия на прочностные характеристики можно принять гармонические или близкие к ним колебания с постоянной частотой 30-50 Гц и с амплитудой колебания, меняющейся от 25 до 160 мк.

Для этого требуется установить закономерности изменения зависимости сцепления и угла внутреннего трения от амплитуды, а затем использовать их в формуле для расчета устойчивости земляного железнодорожного полотна.

Лабораторные работы проводились в условиях трехосного напряженного состояния. Моделирование вибродинамического воздействия осуществлялось изменением величины гидростатического бокового давления. Испытывались грунты двух видов: суглинок и глины, которые характеризовались следующими характеристиками (табл. 1):

Таблица 1

Характеристики испытываемых грунтов

Показатель	Суглинок	Глина
W_p	0,17	0,23
W_L	0,28	0,41
I_p	0,11	0,18
W_I	0,21	0,27
$\gamma_{\text{опт}}, \text{гс/см}^3$	2,07	1,99
$\gamma, \text{гс/см}^3$	2,01	1,94
$\delta = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{опт}}}$	0,17	0,975
гигроскопическая влажность	0,037	0,052

Частота колебаний частиц грунта, по результатам методических опытов, была принята равно 60 Гц.

Эксперименты позволили установить 3 стадии изменения сцепления. Первая характеризуется относительно небольшим диапазоном изменения амплитуды, в пределах которого сцепление не меняется или изменяется на величину до 4% от первоначального значения.

Вторая стадия их охватывает интервал амплитуд, в котором происходит наибольшее снижение сцепления. В нашем случае он расположен в пределах от 30 до 120 мк для суглинков и от 55 до 155 мк для глин. Амплитуда, характеризующая переход от первой стадии ко второй, названа нами начальной (A^n) и составляет для суглинка 30 мк, для глины – 55 мк. В третьей стадии величина сцепления практически не снижается при дальнейшем увеличении амплитуды колебаний, достигая некоторого минимума при действующих в натуральных условиях амплитудах колебаний грунтов железнодорожного земляного полотна. В нашем случае третья стадия расположена для суглинков в интервале от 120 мк и выше, а для глин – от 155 мк и выше.

Результаты исследований хорошо аппроксимируются следующим выражением:

$$C_{\text{дин}} = C_{\text{мин}} + (C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}})e^{-k(A-A^n)}, \quad (1)$$

где $C_{\text{дин}}$ – сцепление грунта при некоторой величине действующей амплитуды колебаний (A); $C_{\text{мин}}$ – сцепление, определенное при такой амплитуде, увеличение которой вызовет дополнительное существенное снижение; $C_{\text{макс}}$ – сцепление при действии статической нагрузки; e – основание натурального логарифма; k – коэффициент виброразрушения, при испытании в условиях трехосного напряженного состояния, равный для глин 0,018, для суглинка – 0,012; A – действующая амплитуда колебаний в микропорах; A^n – начальная амплитуда колебаний, при

действии которой снижение сцепления не превышает 4 % от исходной величины $C_{\text{макс}}$.

Изменение угла внутреннего трения грунта описывается аналогичной зависимостью. При этом следует отметить относительно большой разброс значений.

Грунты железнодорожного земляного полотна, воспринимающего вибродинамическую нагрузку, в зависимости от их расположения по глубине и ширине полотна подвергаются воздействию колебаний с различной амплитудой. Наибольшие амплитуды регистрируются на основной площадке по оси пути. При удалении от оси, а также при углублении в тело полотна амплитуда уменьшается. Следовательно, влияние прочностных характеристик в соответствии с выражением (1) будет меняться по закону компоненты.

Для оценки устойчивости земляного полотна необходимо знать закономерность распределения амплитуд колебаний в теле полотна, которая с небольшим изменением и при определенном приближении достаточно хорошо описывается формулой, предложенной В.А. Ершовым [2].

$$A = A_0 \cdot e^{-\delta_1 z - \delta_2(x-b) + \delta_3(x-a-b)}, \quad (2)$$

где A – амплитуда колебаний грунта земляного полотна в точке с координатами «Z» и «X»; A_0 – амплитуда колебаний основной площадки по оси пути; e – основание натурального логарифма; δ_1 – коэффициент угасания амплитуды по глубине для глины – 0,22, для суглинка – 0,33; z – глубина от основной площадки; δ_2 – коэффициент угасания амплитуды в горизонтальном направлении для глины 0,11, для суглинка 0,15; x – расстояние по горизонтали в поперечном направлении от рассматриваемой точки до оси пути; b – ширина обочины; δ_3 – коэффициент, учитывающий влияние откоса. Определяется по формуле

$$\delta_3 = 1,17 \frac{\delta_1}{m} - \delta_2,$$

где m – заложение откоса; a – половина ширины балластной призмы в основании.

Значения коэффициентов затухания δ_1 и δ_2 определены в полулогарифмических координатах и характеризует уменьшение амплитуды при удалении от источника колебаний. При этом логарифмировался коэффициент, показывающий отношение амплитуд, замеренных на некотором расстоянии от источника колебаний, к амплитудам, замеренным непосредственно под ним, т.е.

$$\lg \frac{A_x}{A_0}.$$

В выражении (2) все линейные размеры представлены в метрах, а амплитуды в микронах. Если $X < a$ или $X < a + b$, то в первом случае второе и третье слагаемое, а во втором случае – только третье слагаемое в показателе степени не учитывается.

Если найденные таким образом величины амплитуд колебаний подставить в выражение (1), то можно в соответствующих точках получить значения сцепления с учетом снижения их величин под влиянием вибрационного воздействия.

Для определения устойчивости земляного железнодорожного полотна необходимо получить кривую смещения и разбить её на отсеки по общепринятому правилу. Если получатся отсеки длиной более 3 метров, то их можно разделить пополам, стремясь к получению отсеков не более 2,5 м. По данным построения линии смещения, независимо от принятой формы смещения, определяются значения «X» и «Z» для точек, лежащих на линии смещения в характеризующих границы отсеков.

Если значения «X» и «Z» подставить в выражение 2, а полученные из него величины амплитуд – в выражение 1, то для всех отсеков по линии скольжения будем иметь по два значения сцепления и трения, охватывающих диапазон изменения прочностных характеристик в пределах того или иного отсека. Следовательно, введением этих значений сцепления и трения в формулу для определения устойчивости обеспечивается учет влияния вибродинамического воздействия на устойчивость земляного железнодорожного полотна.

Формула для определения коэффициента местной устойчивости имеет следующий вид:

$$K = \frac{\sum C_i^{\text{дин}} l_i + \sum N_i \varphi_i^{\text{дин}}}{\sum T_i}, \quad (3)$$

где $C_i^{\text{дин}}$ – сцепление в i -ом отсеке насыпи, воспринимающей вибродинамическую нагрузку; l_i – длина i -ого отсека по плоскости скольжения; N_i – нормальная сила i -ого отсека от собственного веса грунта и временной нагрузки; $\varphi_i^{\text{дин}}$ – коэффициент трения, равный тангенсу угла внутреннего трения грунта, воспринимающего динамическую нагрузку; T_i – сдвигающая сила i -ого отсека.

Значения прочностных характеристик в формуле местной устойчивости земляного полотна определяется по каждому отсеку как среднеарифметическая величина двух значений, соответствующих точкам, лежащим на линии скольжения, принадлежащим двум смежным отсекам. Фактическая зависимость изменения прочностных характеристик в пределах отсека имеет характер квадратичной функции, однако линейная аппроксимация значительно упрощает расчеты, а погрешность при этом повышает коэффициент устойчивости полотна в натуральных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жинкин Г.Н. Исследование тиксотропии глинистых грунтов. Сб. трудов ЛИИЖТа, №197, 1962.
2. Ершов В.А., Костюков И.И. Колебания грунтов в железнодорожных насыпях. Механика грунтов и фундаментостроение. Труды ЛИСИ, №61, 1970.
3. Преображенская Н.А., Савченко И.А. О влиянии вибрации на сопротивление глинистых грунтов сдвигу. В сб. трудов НИИ оснований и фундаментов. «Динамика грунтов», №32, 1958.
4. Прокудин И.В. Исследование влияния динамического воздействия поездов на прочность мерзлых грунтов в условиях Октябрьской жд. Материалы XXII научно-технической конференции ЛИИЖТа, 1970.
5. Калачук Т.Г. К вопросу проектирования и строительства на слабых грунтах. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №5. С. 120–125.
6. Калачук Т.Г., Шатохина С.И. Расчет давления несвязного грунта на подпорные стенки (статья) Материалы X Междунар. научно-практич. конференции «Ключови въпроси в съвременната наука – 2014», София, "БелГРАД-БГ", 17-25 апреля 2014 г. - Т. 34 "Здание и архитектура". С. 3–5.
7. Казикаев Д.М., Сергеев С.В., Черныш А.С. Экспериментальная оценка параметров сдвига массивов пород при водопонижении (статья). Сборник «Известия ТулГУ Серия Геомеханика. механика подземных сооружений». Тула, 2005. С. 77–80.

Chernysh A.S.**EFFECT OF DYNAMIC LOAD ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF CLAY SOIL AND STABILITY SUBGRADE**

Vibrodynamic effects are a major cause of loss of stability of slopes of earth embankments and ground. Under the influence of a reduction in vibration strength characteristics of soil - the angle of internal friction (φ) and the specific clutch (c). Derating size depends on several factors, such as amplitude and frequency of oscillation, humidity, density, stress state of soils. Forecast changes in strength properties is the basis of accurate calculation of the stability of the roadbed. Preparation of soil strength characteristics of dependencies changes can significantly improve the accuracy of calculating the stability of slopes embankments.

Key words: *vibrodynamic exposure, internal friction angle (φ), specific cohesion (c), the slope, the stability of the roadbed.*

Черныш Александр Сергеевич, профессор, кандидат технических наук, доцент.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: gkadastr@mail.ru