

Расчет устойчивости откосов железнодорожных насыпей по поверхности скольжения в виде логарифмической спирали

В статье рассматривается методика оценки устойчивости железнодорожной песчаной насыпи, основанная на использовании в расчетах поверхности скольжения в виде логарифмической спирали. Обосновывается преимущество данной методики расчета устойчивости перед другими способами решения подобных задач.

Ключевые слова: железнодорожная насыпь, устойчивость, логарифмическая спираль, учёт колебаний, инерционная сила, линия скольжения, полярный радиус, коэффициент устойчивости.

Расчет устойчивости земляного полотна железных дорог относится к общей проблеме расчета устойчивости естественных склонов и откосов грунтовых сооружений, однако имеет свою особенность. Эта особенность заключается в том, что земляное полотно и его основание при прохождении состава подвержено воздействию случайных колебаний, которые ухудшают его устойчивость.

В настоящее время существует три самостоятельных направления в разработке проблем устойчивости грунтов.

К первому направлению относятся приближенные методы решения задач устойчивости грунтов, одним из которых является широко известный метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Второе направление составляет теория предельного равновесия грунтов. Третье направление сводится к тому, чтобы отыскать уравнение экстремальной поверхности скольжения.

В настоящей статье для решения задачи устойчивости откосов и оснований железнодорожного песчаного земляного полотна рассматривается приближенный метод расчета, основанный на принятии поверхности скольжения в виде логарифмической спирали [1]. Расчетная схема оценки устойчивости насыпи с использованием такой поверхности скольжения обладает некоторыми преимуществами по сравнению с традиционной расчетной схемой метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Эти преимущества заключаются в следующем:

1. Натурные наблюдения показывают, что поверхности скольжения при обруше-

нии песчаных насыпей по своему очертанию ближе к логарифмической спирали, чем к окружности.

2. При записи уравнения моментов относительно центра вращения отпадает необходимость в нахождении закона распределения напряжений по поверхности скольжения, так как направления распределения напряжений проходят через точку центра вращения.

3. Метод логарифмической спирали позволяет получать предельные нагрузки, близкие к значениям, определенными методами теории предельного равновесия грунтов.

4. Использование такой линии скольжения упрощает учет различной конфигурации откосов и наличия берм.

Воздействие инерционных сил от подвижного состава позволяет находить линию скольжения только в верхней части насыпи, так как наибольшие силы инерции приходятся непосредственно на верхнюю часть строения земляного полотна. В связи с этим нет необходимости оценивать устойчивость земляного полотна с захватом глубоких масс грунта насыпи.

Ниже рассматривается решение задачи оценки устойчивости насыпи, выполненное по данному методу.

Для построения линии скольжения (рис. 1) использовалась экспоненциальная зависимость

$$r_i = r_0 e^{Q \operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта, град; r_0 – начальный радиус для построения линии скольжения логарифмической спирали, м.

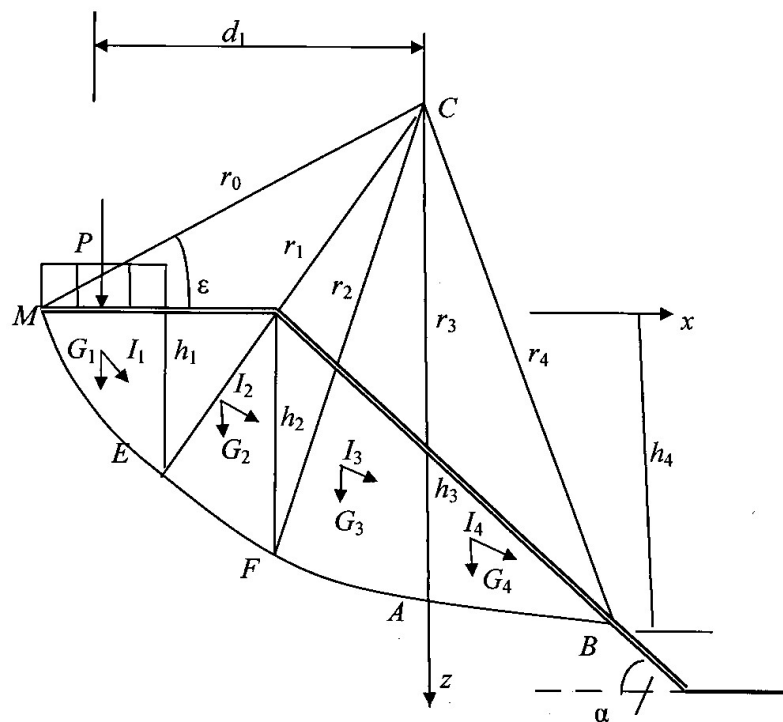


Рис. 1. Расчет устойчивости откоса насыпи по поверхности скольжения в виде логарифмической спирали

Начальный радиус r_0 принимается с наклоном к горизонту под углом ε – тем самым определится полюс этого радиуса в точке C .

Угол, образованный начальным радиусом и радиусом от полюса C до точки пересечения линии скольжения с линией откоса насыпи, составляет угол Q . Определение величины этого угла производится методом итерации. Для построения логарифмической спирали угол Q разбивается на промежуточные полярные углы Q_i , для каждого из которых по формуле (1) вычисляется значение полярного радиуса r_i .

Расстояния h_1 , h_2 , h_3 и h_4 от уровня основной площадки точек E , F , A и B соответственно определяются по формулам:

$$h_1 = r_0 e^{Q_1 \operatorname{tg} \varphi} \sin \left(Q_1 + \arcsin \frac{z}{r_0} \right) - z; \quad (2)$$

$$h_2 = r_0 e^{(Q_1 + Q_2 + Q_3) \operatorname{tg} \varphi} \sin \left(Q_1 + Q_2 + \arcsin \frac{z}{r_0} \right) - z; \quad (3)$$

$$h_4 = r_0 e^{(Q_1 + Q_2 + Q_3) \operatorname{tg} \varphi} - z - z'; \quad (4)$$

$$h_4 = r_0 e^{(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \operatorname{tg} \varphi} \cos Q_4 - \cos(Q_1 + Q_2 + Q_3), \quad (5)$$

где $z = r_0 \cos Q_1$; $z' = x' / m$; $x' = x - D$; $x = r_0 \cos(Q_1 + Q_2 + Q_3) \operatorname{tg}(Q_1 + Q_2 + Q_3)$.

Расстояние D равно сумме расстояний от середины пути, включая размер бровки. Величина m равна величине заложения откоса.

После определения площади отсеков устанавливаются нагрузки от каждого из них, которые прикладываются в центре тяжести этих отсеков. В этих же центрах прикладываются инерционные силы, направление которых перпендикулярно полярному радиусу.

Опыты по замеру ускорений колебаний при движении поездов, проведенные на песчаных железнодорожных насыпях по линии Тюмень – Нижневартовск [2, 3], дали результаты, показанные на рис. 2.

На основании экспериментальных данных были получены эмпирические зависимости изменения ускорений колебаний в теле насыпи с учетом скорости движения поезда с нагрузками на ось подвижного состава, равными 294 кН/ось:

$$a_i = \xi a_0 e^{-0,25z + 0,08x}, \quad (6)$$

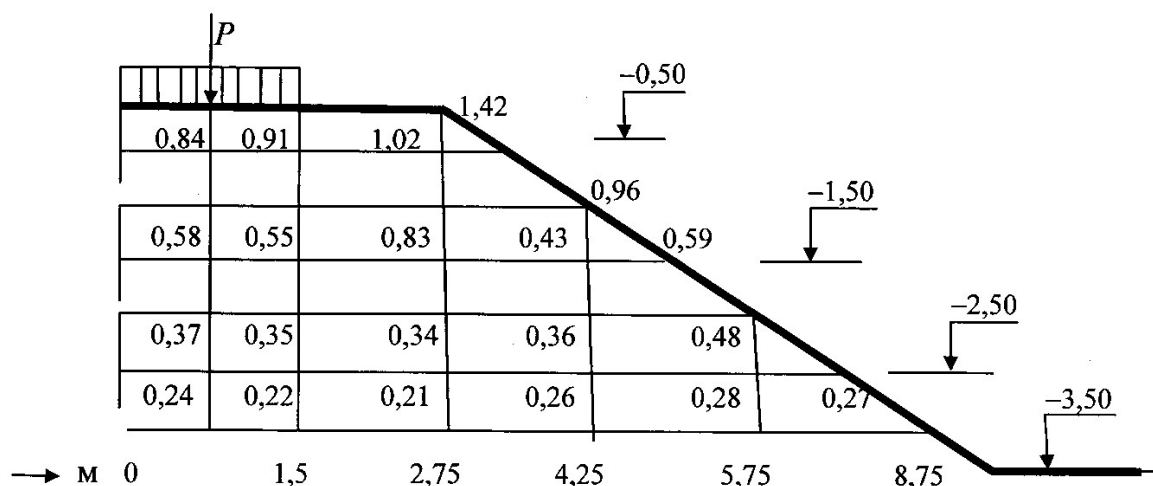


Рис. 2. Распределение модулей ускорений колебаний, возникающих в однопутной железнодорожной насыпи при движении локомотива ($P = 294$ кН/ось, $V = 90$ км/ч, $f = 30$ Гц)

где $a_0 = 1,2$ м/с² – результирующее значение максимальных амплитуд ускорений колебаний в уровне основной площадки пути; z – глубина расположения точки, для которой вычисляется ускорение (отсчитывается от точки замера a_0); x – горизонтальное расстояние от оси железнодорожного пути до точки, в которой вычисляется ускорение.

Коэффициент ξ увеличения ускорений колебаний на уровне основной площадки в зависимости от скоростей определяется по формуле

$$\xi = \xi_1 - \xi_2 e^{-\beta(V-V_0)}, \quad (7)$$

где ξ_1 и ξ_2 – безразмерные коэффициенты, равные соответственно 1,16 и 0,46; β – коэффициент, учитывающий скорость подвижного состава, равный 0,025; V – скорость движения поезда, км/ч; $V_0 = 40$ км/ч – рабочий диапазон, ниже которого динамическое воздействие практически не влияет на устойчивость откосов.

Коэффициент устойчивости K_y определяется отношением сумм внешних и внутренних сдвигающих и удерживающих сил (моментов):

$$\frac{M_{сд}}{M_{уд}} = \frac{Pd_1 + G_1d_2 + G_2d_3 + G_3d_4 + (I_1r'_1 + I_2r'_2 + I_3r'_3 + I_4r'_4)/\sin \alpha}{G_4d_5} \geq K_y, \quad (8)$$

где $M_{сд}$, $M_{уд}$ – момент сдвигающих и удерживающих сил соответственно, кН·м; P – поездная нагрузка на насыпь, кН; G_1 , G_2 , G_3 ,

G_4 – вес соответствующего отсека, кН; d_1 – расстояние от центра тяжести внешней нагрузки до полярного центра C , м; d_2 , d_3 , d_4 , d_5 – расстояния от центра тяжести каждого отсека до полярного центра C , м; I_1 , I_2 , I_3 , I_4 – сдвигающая сила инерции в соответствующем отсеке, равная массе грунта, умноженной на величину ускорения, определенного в центре тяжести отсека по формуле (6), кН; r'_1 , r'_2 , r'_3 , r'_4 – радиусы от полярного центра до точки приложения инерционной силы в соответствующем отсеке, м; α – угол заложения откоса, град.

Путем задания различных значений радиуса r_0 и угла ϵ наклона радиуса к горизонту находится минимальное значение коэффициента устойчивости для данной насыпи.

Выполненные расчеты устойчивости насыпи по поверхности скольжения в виде логарифмической спирали показывают, что среднее значение снижения коэффициента устойчивости K_y составляет 15...18 % в зависимости от уровня вибродинамического воздействия поездной нагрузки (при нулевой скорости поезда устойчивость насыпи

принимается равной 100 %). Указанные цифры снижения коэффициента устойчивости могут колебаться в ту или иную сторону в зависимости от рассматриваемого объ-

ема обрушения откоса. Так, при рассмотрении потери устойчивости откоса в верхней части насыпи в силу наибольших инерционных сил процент снижения коэффициен-

та устойчивости будет большим, чем при рассмотрении линии скольжения с захватом значительных масс грунта насыпи.

Библиографический список

1. Соловьев Ю.И., Караулов А.М., Смолин Ю.П. Современные методы расчета устойчивости земляного полотна железных дорог. Новосибирск: Изд-во СГАПС, 1996. 82 с.
2. Смолин Ю.П., Соловьев Ю.И. Практические методы расчета железнодорожных насыпей, сложенных мелкими и пылеватými песками // Труды юбилейной конференции, посвященной 50-летию РОМГТИФ «Российская геотехника – шаг в XXI век», Москва, 15–16 марта 2007 г. М., С. 91–98.
3. Смолин Ю.П. Динамическое воздействие поездов на земляное полотно // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири: Сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2008. С. 28–42.

Smolin Y.P., Karaulov A.M. The Slopes of the Railway Embankments: the Calculation of Stability Based on the Gliding Surface in the Form of the Logarithmic Spiral. The assessment of the stability of a slope of a railway embankment, based on the gliding surface in the form of the logarithmic spiral is concerned. The advantage of the above assessment method over other methods of solving the problem is justified.

Key words: *railway embankment; stability; logarithmic spiral; acceleration of fluctuations; inertial force; sliding line; polar radius; stability coefficient.*

Смолин Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Геология, основания и фундаменты» СГУПС. Научные интересы: прочность железнодорожных насыпей, воспринимающих воздействие динамических нагрузок. E-mail: yuij.smolin@bk.ru

Караулов Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, завкафедрой «Геология, основания и фундаменты» СГУПС. Область научных интересов: теория предельного равновесия грунтов, численное моделирование упругопластического деформирования грунтов, прикладные задачи механики грунтов. E-mail: karaulov@stu.ru