

**БОЛОТБЕК Т., НАСЫРЫНБЕКОВА К.У., САПАРБЕКОВ А.С.,
ЖОЛБОЛДУЕВ А.П.**

¹КГУСТА им. Н. Исанова Бишкек, Кыргызская Республика

**BOLOTBEK T., NASYRYNBEKOVA K.U., SAPARBEKOV A.S.,
JOLBOLDUEV A.P.**

¹KSUCTA n. a. N. Isanov Bishkek, Kyrgyz Republic
(temir.b.amir@gmail.com, nkaukhar@mail.ru, saparovaltynbek94@gmail.com,
alishka0210@mail.ru)

МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЗИСТЕНТНЫХ К СЕЙСМИЧЕСКИМ СИЛАМ ГРУНТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

METHODS OF CALCULATION OF RESISTANCE TO SEISMIC FORCES OF GROUND STRUCTURES

Макалада сейсмикалык термелүүлөр учурунда топурак түзүмдөрүнүн туруктуулугу жана аларды чыныгы жер титирөөлөрдө эсептөө ыкмалары талкууланат. Бул тармактагы ар кандай авторлордун эсептөө методологиялары каралып, ар кандай инженердик жана жасалма конструкциялардын топтору үчүн колдонулуучу өзүлөрүнүн методдору сунушталат.

Өзөк сөздөр: кыртыштын түзүлүшү, топурак негизи, жээк, казуу, жантайыңкы, каршылык, сейсмикалык таасир.

В статье рассматриваются вопросы устойчивости грунтовых сооружений при сейсмических колебаниях и методы их расчета в условиях реальных землетрясений. Рассмотрены методологии расчета различных авторов в данной области и предложены собственные методы применимые для различных групп инженерных и искусственных сооружений.

Ключевые слова: грунтовое сооружение, земляное полотно, насыпь, выемка, откос, резистентность, сейсмическое воздействие.

The article discusses the stability of soil structures during seismic vibrations and methods for their calculation in real earthquakes. The calculation methodologies of various authors in this field are considered and their own methods are proposed that are applicable for various groups of engineering and artificial structures.

Key words: soil structure, subgrade, embankment, excavation, slope, resistance, seismic impact.

Главным фактором по обеспечению резистентности грунтовых сооружений к усилиям сейсмических воздействий является увеличение пологости откосов [1]. В этой связи [2], на основе рассмотрения равновесия частиц грунта на откосе, предложил аналитическую формулу для определения угла наклона сейсмически устойчивого откоса насыпи, выполненного из несвязного грунта.

$$tg\alpha = \frac{tg\varphi - K_c}{1 + K_c tg\varphi} \quad (1)$$

где φ - угол естественного откоса грунта;

K_c - Сейсмический коэффициент для горизонтальных смещений грунта.

Формулу (1) экспериментально уточнил В.О. Цшохер [7]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \varphi - 0,5 * K_c}{1 + 0,5 * K_c * \operatorname{tg} \varphi} \quad (2)$$

Как в (1), а также в уточненном для нее варианте (2), не входят частотные и жесткостные факторы.

Теоретически жесткая постановка задачи построения равноустойчивого откоса, основанная на теории предельного равновесия сыпучей среды, дана В.В. Соколовским.

В технических условиях и нормах проектирования гидротехнических сооружений рекомендован устойчивый угол откоса плотины [1]:

$$\alpha = \varphi - \operatorname{arctg} K_c \quad (3)$$

Для определения откосов плотины предложена следующая формула:

$$\alpha = \varphi - 63^\circ K_c \quad (4)$$

Г.М. Шахунянц предложил метод расчета откоса с учетом сейсмичности, применительно к методу расчета по круглоцилиндрической поверхности оползания [3]. Поверхность участка сползания разбивается на отсеки под углом

$$\alpha_{\text{сейсм}} = \operatorname{arctg} K_c \quad (5)$$

Вычисляется равнодействующая R_i , приложенная к каждому отсеку (весом P), принимая направление сейсмических сил горизонтальным.

$$R = \sqrt{P^2 + S^2} \quad (6)$$

где

$$S = P * K_c$$

откуда

$$R = P * \sqrt{1 + K_c^2}$$

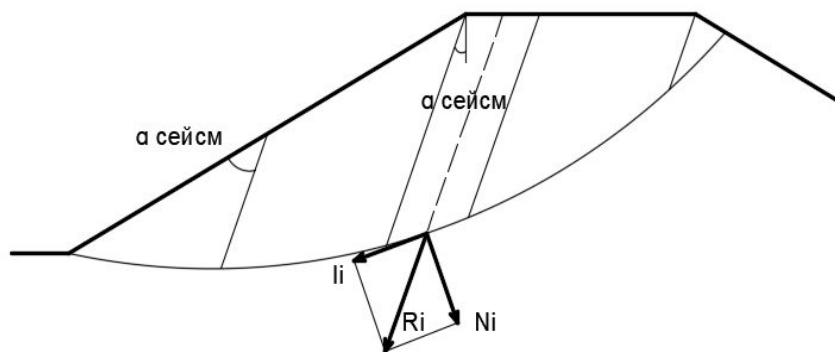


Рис. 1. Схема к расчету откоса по методу Г.М.Шахунянц

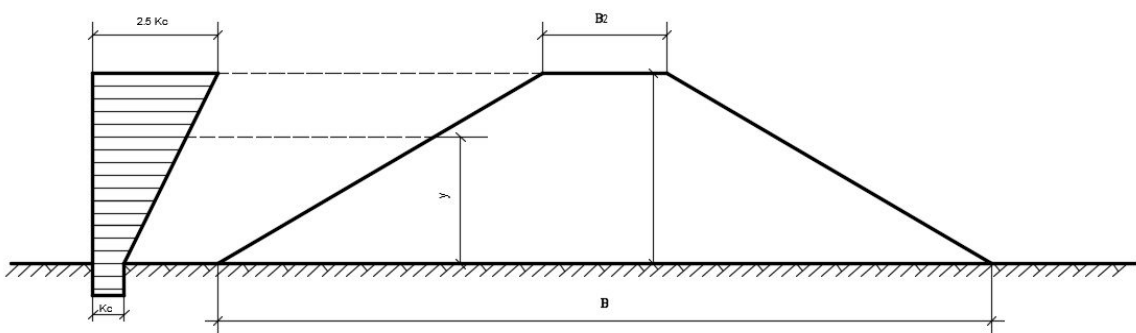
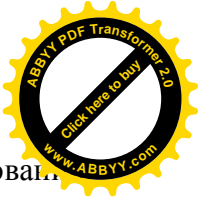


Рис. 2. Эпюра сейсмического ускорения насыпи

Далее, принимая R_i в каждом отсеке за обычную силу тяжести, но направляя ее под углом $\alpha_{\text{сейсм}}$ к вертикали, делят на нормальную и касательную к поверхности сползания и расчет производится по принятым для статических сил способом.



Н.Н. Масловым рекомендуется учитывать сейсмические силы при использовании метода горизонтальных сил в выражении для коэффициента сопротивления грунта сдвигу в следующем виде [4]

$$F_{pc} = \text{tg}(\varphi - \alpha_{\text{сейсм}} + \frac{C}{P_c}) \quad (7)$$

где F_{pc} - коэффициент сопротивления грунта сдвигу, с учетом сейсмичности;

φ - угол внутреннего трения;

$\alpha_{\text{сейсм}}$ - сейсмический угол

$$\alpha_{\text{сейсм}} = \text{arctg} K_c$$

где K_c - коэффициент сейсмического ускорения, C - сцепление; P_c - величина нормального давления с учетом сейсмичности

$$P_c = P(1 + K_c)$$

P - величина нормального давления без учета сейсмичности

Значение сейсмического угла и сейсмического ускорения, в зависимости от расчетной сейсмичности, рекомендуется в табл. 1 [1].

Таблица 1 – Значение сейсмического угла и сейсмического ускорения

Расчетная сейсмичность в балах	Расчетное сейсмическое ускорение, мм/с ²	Сейсмический угол, град.
7	101-250	2
8	251-500	3
9	501-1000	6
10	1001-2500	14
11	2501-5000	27
12	5000	27

Предложенная Н.Н. Масловым формула (4) для подтопленного откоса такова:

$$\eta = \frac{\sum (P_i \cdot \cos \alpha_i - \omega_i \cdot \gamma_w \cdot h_z) \cdot \text{tg} \varphi}{\sum P_i \cdot \sin \alpha_i} \quad (9)$$

где α_i - угол наклона скольжения к горизонту в соответствующем блоке;

ω - площадь основного блока;

γ_w - объемный вес воды;

h_z - динамический напор на расстоянии Z от поверхности.

Для скальных грунтов при учете сейсмических сил М.А. Ревазов и Т.К. Пустовойтова [8] предлагают расчет, исходя из наиболее неблагоприятного направления сейсмических сил, при котором получается максимальное увеличение сдвигающих сил и наименьший коэффициент запаса устойчивости откоса, который равен

$$K_3 = \frac{\sum T_{уд} - S \cdot \sin \beta \cdot \text{tg} \varphi}{\sum T_{сд} - S \cdot \cos \beta} \quad (10)$$

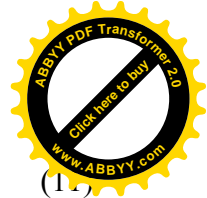
где $T_{уд}$ - сумма удерживающих сил;

$T_{сд}$ - сумма сдвигающих сил;

S - сейсмическая сила, $S = OK_c$

β - угол между поверхностью скольжения и направлением сейсмической силы в вертикальной плоскости.

Если плоскость скольжения прямолинейная поверхность с углом трения α , то уравнение (10) примет вид



$$K_3 = \frac{Q \operatorname{tg} \varphi (\cos \alpha - K_c - \sin \beta) + c l}{Q (\sin \alpha + K_c \cos \beta)} \quad (11)$$

Для определения наивыгоднейшего угла β , при котором получается максимальное значение K_3 , взята первая производная от уравнения (10) и приравнена к нулю. Получилось выражение для вычисления наиболее неблагоприятного значения β

$$\sin \beta = \frac{(\sum T_{сн} + S) \operatorname{tg} \varphi}{\sum T_{уд}} \quad (12)$$

При креплении откосов земляного полотна цементобетонными плитами или каменный наброской и др., определить коэффициент запаса можно по методике, изложенной в работе [1].

Как видно из изложенного, существующие методы расчета откосов выемки и насыпи имеют то общее, что ни в одном из них не учитывается влияние ширины сооружения на крутизну откосов. Поэтому они применимы для расчета земляного полотна, проходящего в выемке.

Впервые о необходимости различного метода решения откосов насыпи и выемки земляных сооружений говорится и обосновывается в работе Ш.Р.Ризаева [6]. Автором этой работы разработаны методы расчета откосов насыпи и выемки с учетом и без учета сейсмических сил, отдельно для связных грунтов и сыпучих грунтов. Далее, вполне обосновано отмечено, что существующие методы расчета независимо от исходных положений имеют то общее, что ни в одном из них не учитывается влияние ширины сооружения на крутизну откоса. Поэтому они применимы только для сооружений типа выемки и сопоставимы с соответствующим предлагаемым решением плоской или линеаризованной задачи. Предлагаемое решение линейной задачи Ш.Р. Ризаевым относится к расчету насыпных земляных сооружений и несопоставимо ни с одним другим методом.

Как известно, статическая теория сейсмостойкости, разработанная К.С. Завриевым, М.Т. Уразбаевым, Ш.Г.Напертваридзе [1, 9] значительно устранила недостатки статической теории, учитывая упругие свойства сооружений и переменность сейсмических сил по высоте сооружения.

Для насыпных плотин [1] эпюра расчетного сейсмического ускорения приведена на рис.2, где максимальная величина на уровне гребня плотины в 2,5 раза больше, чем на уровне основания. Промежуточная ордината расчетного сейсмического коэффициента равна

$$K_c(Y) = K_c + (2,5K_c - K_c) * \frac{Y}{H}$$

или

$$K_c(Y) = K_c (1 + 1,5 * \frac{Y}{H}) \quad (13)$$

Сейсмическая инерционная сила, приходящаяся на единицу объема тела плотины, равна

$$S(Y) = j K_c(Y) \quad (14)$$

j - Объемный вес грунта плотины или насыпи.

Сейсмическая сила, действующая на сооружение, равна

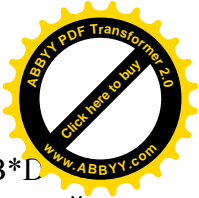
$$S = 1,5 K_c Q \quad (15)$$

Используя вышеизложенное результаты и распределение сейсмического коэффициента по высоте плотины

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{\operatorname{tg} \varphi - 1,5 K_c K_3}{K_3 - 1,5 K_c K_3} \quad (16)$$

Для расчета устойчивости «сухого» откоса Р.Р. Чугаев [10] рекомендует учитывать действующие на отсек обрушения сейсмические силы с помощью способа поворота откоса. По этому способу заданный откос ВД с дугой обрушения (рис. 3.) поворачивается на величину сейсмического угла $\alpha_{\text{сейсм}}$, который равен

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{сейсм}} = 1,5 K_c \quad (17)$$



Вместо действительного отсека обрушения ABD получается отсек А*В*Д рассчитывается в предположении, что сейсмические силы отсутствуют, а найденный коэффициент запаса устойчивости K_3 принимается за коэффициент запаса устойчивости действительного отсека обрушения.

Исследование земляных сооружений показали, что в условиях динамических воздействий потеря устойчивости откоса имеет вид послынного оползания грунта по плоским поверхностям и верхней части, либо по кривой поверхности.

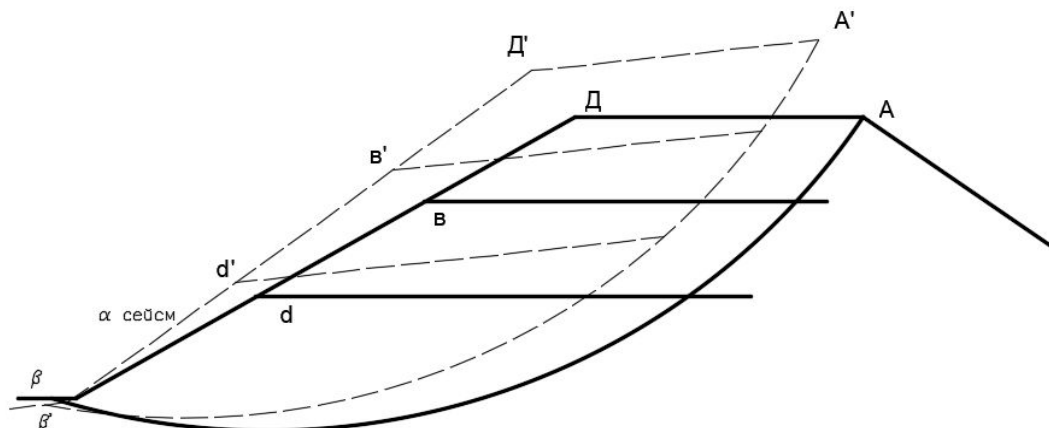


Рис. 3. Схема расчета откоса по методу Р.Р.Чугаева

В настоящее время наиболее теоретически обоснованным является метод расчета устойчивости откосов плотин из местных материалов. Этот метод расчета предусматривает два вида проверки устойчивости:

1. На возможность послынного оползания грунта по плоским поверхностям в верхней части плотины, где интенсивность сейсмических инерционных сил достигает максимума.
2. На возможность оползания части откоса по криволинейной поверхности.

Определяется коэффициент запаса устойчивости из выражения

$$K_3 = \frac{tg\alpha(Z) - K_c S(Z) * \sin\alpha(Z)}{\sin\alpha(Z) + K_c S(Z) * \cos\alpha(Z)} \quad (18)$$

где $\alpha(Z)$ - фактический угол наклона, рассчитываемого откоса к горизонту на рассматриваемом уровне;

$tg\varphi = \phi$ —коэффициент трения грунта;

K_c -коэффициент расчетной сейсмичности;

$S(z)$ -безмерная величина интенсивности горизонтальной сейсмической инерционной нагрузки определяется по графику, в зависимости от периода собственных колебаний T_i и соотношения $\frac{z}{H}$;

Z -расстояние от подошвы насыпи до уровня, на котором предполагается проверка устойчивости откоса.

Период собственных колебаний можно определить по следующей формуле [1]

$$T_i = 0.7 \frac{B}{B - B_0} * H \sqrt{\frac{\gamma}{G}} \quad (19)$$

где B_0 -ширина насыпи поверху, м;

B -ширина насыпи, м;

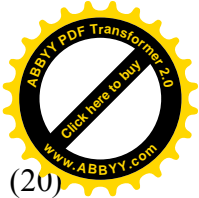
H -высота насыпи, м;

γ -объемный вес грунта насыпи, кН/м³

G -модуль упругости грунта насыпи на сдвиг, кН/м³;

Ω -коэффициент приведенного поперечного сечения ($\Omega=0,7$)

Формулу (18) можно записать и так



$$K_3 = tg\varphi \frac{1 - K_c S(Z) + tg\alpha(Z)}{tg\alpha(Z) + K_c S(Z)} \quad (20)$$

тогда сейсмическое устойчивое заложение откоса насыпи на уровне Z равно

$$tg\alpha(Z) = \frac{tg\varphi - K_3 K_c S(Z)}{K_3 tg\alpha - K_c S(Z)} \quad (21)$$

Второй вид проверки на возможность оползания части откоса по криволинейной круглоцилиндрической поверхности.

Радиусом R проводится круглоцилиндрическая поверхность смещения, степень устойчивости при предполагаемом обрушении, по которой имеется в виду оценить – рис.4. Возможная призма обрушения разбивается на отсеки, а коэффициент устойчивости откоса определяется из выражения

$$K_3 = \frac{M_{пасс}}{M_{акт.} + M_{акт.сейм.}} \quad (22)$$

где $M_{пасс}$ и $M_{акт.}$ – пассивный и активный моменты относительно центра вращения -0.
 $M_{акт.сейм.}$ – активный момент из-за сейсмического воздействия.

$$\begin{aligned} M_{пасс} &= (\sum N_i tg\varphi + \sum C_i l_i) R \\ M_{акт.} &= R \sum T_i \\ N_i &= Q_i \cos \alpha_i \\ T_i &= Q_i \sin \alpha_i \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} M_{акт.сейм.} &= \sum S_i a_i \\ S_i &= K_c S(Z) Q_i \\ a_i &= R \cos \alpha_i \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \gamma_i \\ Q_i &= \frac{h_{i-1} + h_i}{2} b_i \gamma_i \end{aligned} \quad (24)$$

где i – порядковый номер выделенного элементарного отсека;

N_i, T_i – нормальная и тангенциальная составляющие собственного веса отсека;

Q_i – собственный вес отсека;

α_i – угол между нормалью к поверхности скольжения на участке выделенного отсека и вертикалью;

$S_i(z)$ – безразмерная величина интенсивности горизонтальной сейсмической инерционной нагрузки на уровне центра тяжести рассматриваемого отсека;

a_i – плечо сейсмической силы относительно центра вращения -0;

h_{i-1}, h_i – высота параллельных сторон отсека;

b_i – ширина отсека;

l_i – длина дуги скольжения в пределах отсека;

$C_i \varphi_i$ – удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта в пределах рассматриваемого отсека;

γ_i – объемный вес грунта отсека.

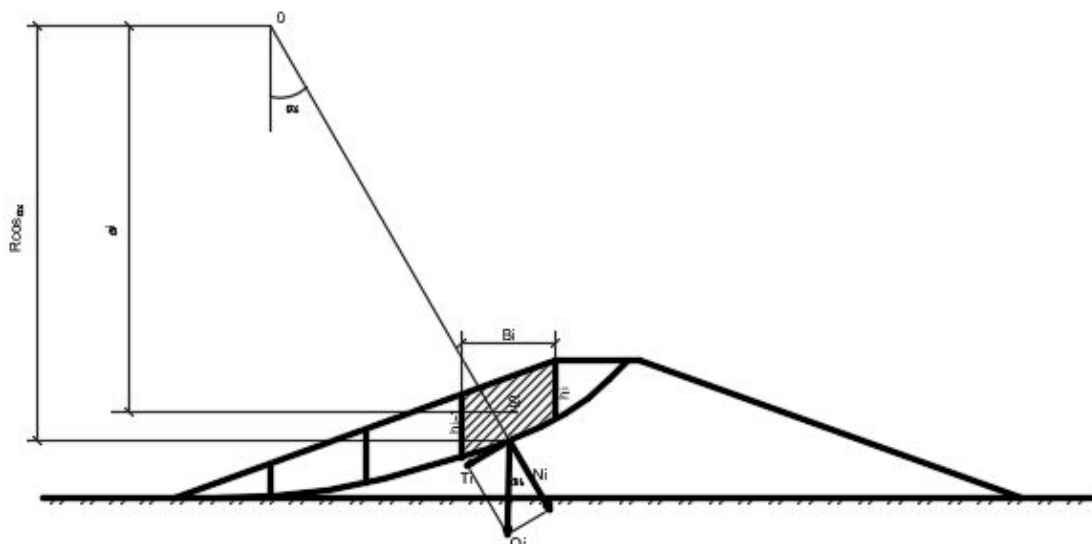


Рис. 4. Схема расчета по методу криволинейной поверхности оползания грунта

Перечисленные расчеты относятся к устойчивости насыпей, выемок, земляных плотин, дамб, каналов, но ввиду некоторой аналогии этих сооружений с земляным полотном дорог, допустимы для расчета на сейсмические воздействия последнего проходящего не по косоугру. Исследование земляных сооружений показали, что в условиях динамических воздействий потеря устойчивости откоса имеет вид послойного оползания грунта по плоским поверхностям и верхней части, либо по кривой поверхности.

Список литературы

1. Абдужабаров А.Х. Сейсмостойкость автомобильных и железных дорог [Текст]/ А.Х.Абдужабаров. – Бишкек: КАСИ, 1996. - 226 с.
2. Напетваридзе Ш.Г. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений [Текст] / Ш.Г.Напетваридзе. – М.: ГСИ, 1959. - С. 91-120.
3. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь [Текст] / Г.М.Шахунянц. - М.: Трансжелдориздат, 1961. - С.10.
4. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии [Текст] / / Н.Н.Маслов. – М.: Автотрансиздат, 1961. - С.20.
5. Медведев С.В. Инженерная сейсмология [Текст] / С.В.Медведев. – М.: ГСИ, 1962.
6. Ризаев Ш.Р. Теория и методы расчета устойчивости откосов земляных сооружений [Текст] / Ш.Р. Ризаев. – Ташкент: Фан. – 1969. - С.62-88.
7. Цшохер В.О. Антисейсмическое строительство [Текст] / В.О. Цшохер, В.А. Выховский // журнал «Наше строительство». – М.: ЦСБ, 1937. - С.8.
8. Ревазов М.Л. Устойчивость скальных массивов в бортах каньонов горных рек [Текст] / М.Л. Ревазов, Т.К. Пустовойтова // Гидротехническое строительство. – 1968. - №1.
9. Уразбаев М.Т. Сейсмостойкость упругих и гидроупругих систем [Текст] / М.Т.Уразбаев // АН УзССР. - Ташкент: Фан, 1966. - 254с.
10. Чугаев Р.Р. Указания по расчету устойчивости земляных откосов [Текст] / Р.Р.Чугаев. - Л.: Энергия, 1967. - С.10-30.