

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ К РАСЧЕТУ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА С УЧЕТОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.Г. Шаповал, Е.С. Причина, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина

В данной статье представлена модифицированная методика расчета устойчивости склона на основе гипотезы прямолинейной поверхности скольжения в условиях сейсмического и гидродинамического влияния.

1. Введение

В связи с тенденцией расширения городской инфраструктуры застраиваются территории, которые ранее считались непригодными для возведения зданий. Очень часто даже вблизи центральных районов городов имеются склоны, на которых ранее не велось строительство, но возведение на них зданий и сооружений может дать значительный экономический эффект. Поэтому является целесообразным изучение состояния склонов и разработка мероприятий по их использованию для строительства [1].

Данные инженерно-геологических изысканий подтверждают, что большинство таких участков часто имеют неблагоприятную для строительства геологию по форме рельефа и составу слагающих грунтов. Таким образом, имеет место проблема расчета устойчивости откосов и склонов.

На сегодняшний день существует большое количество методов расчета склонов, авторы которых подходят к проблеме расчета с разных позиций. На Украине наиболее применимы методы круглоцилиндрической поверхности скольжения, прямолинейной поверхности скольжения, методы горизонтальных сил Маслова-Берера и метод Шахунянца [2].

На наш взгляд, представляет интерес метод расчета устойчивости откосов и склонов с использованием прямолинейной поверхности скольжения (в виду своей простоты). Однако используемый на практике вариант этого метода не позволяет учитывать влияние на устойчивость грунта гидродинамических и сейсмических воздействий и минимальных, и максимальных значений расчетных характеристик грунта. Следствием этого являются неточно выполненные расчеты и прогнозы, которые приводят к обрушениям склонов.

Анализ устойчивости склонов и откосов в описанных методах сводится к определению коэффициента устойчивости K_y и величины оползневого давления.

Далее приведен обзор традиционного метода расчета откоса по методу плоской поверхности скольжения.

2. Анализ литературных источников по исследуемой проблеме

При рассмотрении метода расчета устойчивости грунтового массива на основе гипотезы прямолинейной поверхности скольжения предполагается, что разрушение (сдвиг) возможно вдоль плоскости, наклоненной под углом к горизонту α и проходящей через подошву откоса, устойчивость которого рассматривается (рис.1). Чтобы распределить нормальные напряжения вдоль плоскости разрушения, разделяют грунт над ней на n трапециевидных отсеков равной ширины и принимают, что каждый отсек действует независимо от соседних. На основании этого допущения вертикальное напряжение в любой точке грунта можно определить как $\sigma_z = \gamma \cdot z$.

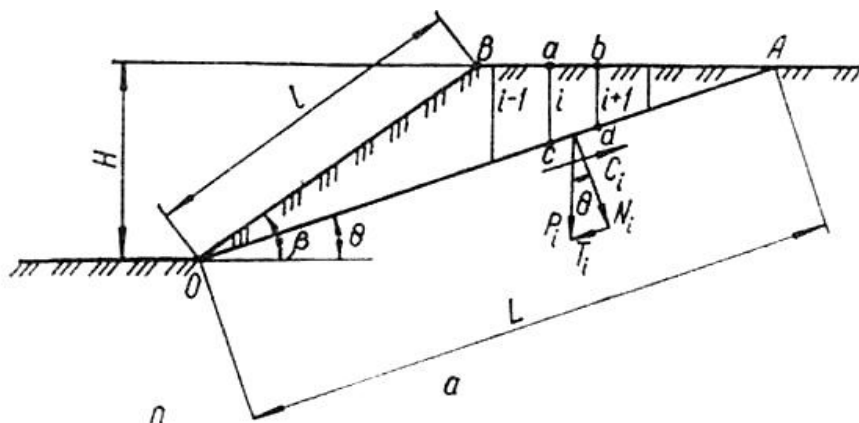


Рис. 1. Схема для расчета устойчивости откоса в рамках гипотезы прямолинейной поверхности скольжения

Для данного отсека с применением метода плоской поверхности разрушения определяется коэффициент устойчивости [3]:

$$K_y = \frac{P \cdot \cos \theta + c \cdot L}{P \cdot \sin \theta} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta} + \frac{c \cdot H}{P \cdot \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

Как видно из данного уравнения, расчет, предлагаемый технической литературой, производится без учета сейсмического и гидродинамического воздействия и корректного использования минимальных и максимальных значений расчетных характеристик грунта, а именно – удельного веса грунта.

Поэтому в следующем разделе приведены результаты модификации данного метода прямолинейной поверхности скольжения, которая заключалась в учете воздействия гидродинамических и сейсмических факторов, а также соответствующих значений расчетных характеристик грунта, создающих, таким образом, наиболее сложные условия загрузки склона.

3. Цель и задачи работы

В современной литературе приведен только упрощенный подход к анализу устойчивости посредством метода прямолинейной поверхности скольжения, поэтому является важным адаптировать его, введя сейсмический и гидродинамический факторы и расчетные характеристики грунта в зависимости от характера загрузки.

Необходимо подчеркнуть, что с нашей точки зрения, использование одинаковых расчетных характеристик грунта (одинаковый расчетный удельный вес) для определения сдвигающей и удерживающей силы является некорректным, т.к. противоречит формированию наиболее невыгодного условия загрузки. С целью получения минимально необходимого коэффициента K_y устойчивости откоса необходимо задать максимальную сдвигающую силу T_{cd} , для которой следует брать максимальный удельный вес γ_{max} , и минимальную удерживающую $T_{уд}$, для которой следует использовать минимальный удельный вес грунта γ_{min} соответственно [4,5].

Таким образом, была поставлена **цель** – выполнить модификацию метода прямолинейной поверхности скольжения, используя сейсмическое и гидродинамическое воздействие, а также различие между расчетными характеристиками грунта. Для этого решались **задачи** для условий водо- и неводонасыщенных склонов с учетом и без учета влияния сейсмичности.

Далее приводятся разработанные на данном принципе методики.

4. Материалы и результаты исследований

4.1. Общие положения и исходные данные

Для рассмотрения ситуации определения устойчивости склона введем следующие положения:

1. Известны координаты дневной поверхности откоса $y(x)$ и подземных вод $y_W(x)$.
2. Известна внешняя нагрузка $q(x)$. При этом следует различать:
 - ее максимальное расчетное значение при коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равное q_{max} ;
 - ее минимальное расчетное значение при коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равное q_{min} ;
3. Известны удельный вес и прочностные свойства грунта. При этом следует различать:
 - максимальный расчетный удельный вес грунта в естественном состоянии при коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\gamma_{I,max}$;
 - минимальный расчетный удельный вес грунта в естественном состоянии при коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\gamma_{I,min}$;
 - максимальный расчетный удельный вес грунта при полном водонасыщении грунта и коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\gamma_{I,sat max}$;
 - минимальный расчетный удельный вес грунта при полном водонасыщении грунта и коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\gamma_{I,sat min}$;
 - максимальный расчетный удельный вес грунта при полном водонасыщении грунта, учете действия взвешивающих сил и коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\gamma_{I,sw,max}$;
 - минимальный расчетный удельный вес грунта при полном водонасыщении грунта, учете действия взвешивающих сил и коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\gamma_{I,sw,min}$;
 - минимальный расчетный угол внутреннего трения грунта в естественном состоянии при коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\varphi_{I,min}$;
 - минимальное расчетное удельное сцепление грунта в естественном состоянии при коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $c_{I,min}$;
 - минимальный расчетный угол внутреннего трения грунта при полном водонасыщении и коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $\varphi_{I,sat,min}$;
 - минимальное расчетное удельное сцепление грунта при полном водонасыщении и коэффициенте доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, равный $c_{I,sat,min}$.
4. В общем случае откос может находиться под воздействием сейсмических сил.
5. При обрушении откоса сползание грунтовой массы происходит по прямолинейной поверхности скольжения (прямая 3 на рисунке 1).
Требуется определить такие значения высоты откоса H и длины поверхности скольжения L , при которых коэффициент устойчивости откоса k_y принимает минимальное значение.

Необходимо подчеркнуть, что в такой постановке задачи в литературе отсутствуют методы расчета устойчивости грунтовых откосов.

4.2. Методика расчета устойчивости неводонасыщенного откоса

Для определения коэффициента устойчивости неводонасыщенного откоса в рамках гипотезы прямолинейной поверхности скольжения рассмотрим схему на рисунке 2.

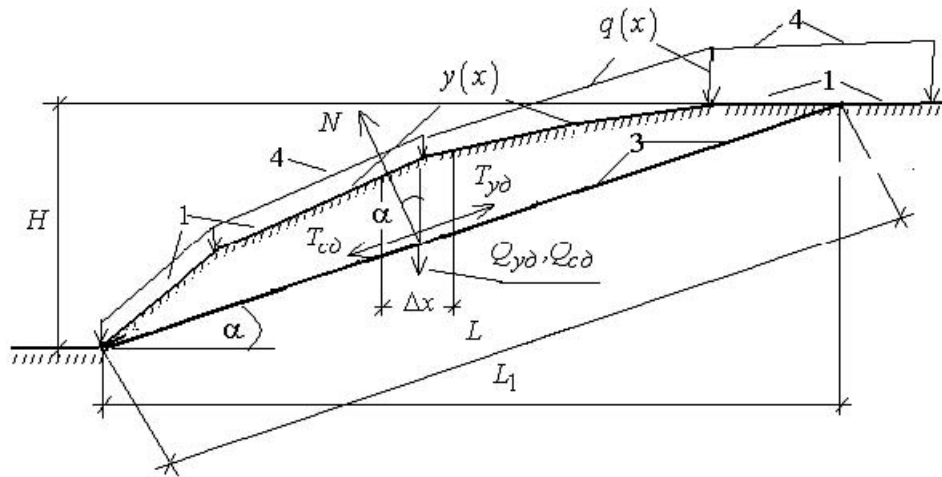


Рис. 2. Схема для расчета устойчивости неводонасыщенного откоса в рамках гипотезы прямолинейной поверхности скольжения.

1- дневная поверхность; 3- поверхность скольжения; 4 –внешняя нагрузка

Из сползающей массы выделим отсек длиной Δx и рассмотрим действующие на него силы (рис. 3).

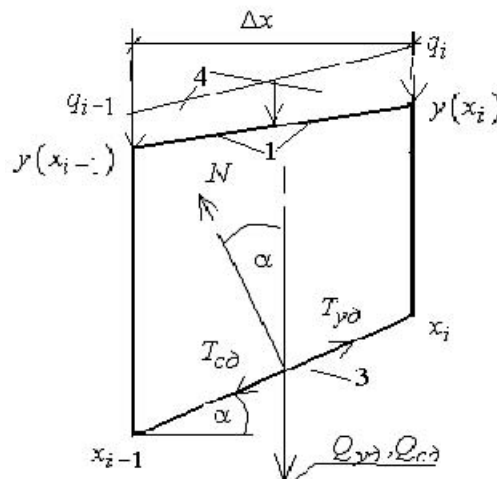


Рис. 3. К определению действующих внутри отсека сил.

1- дневная поверхность; 3- поверхность скольжения; 4 –внешняя нагрузка.

Вес отсека, необходимый для определения сдвигающих сил, определяем по формуле:

$$Q_{cd} = \left\{ \begin{array}{l} [y(x_i) - x_i \cdot \text{tg}(\alpha)] + \\ + [y(x_{i-1}) - x_{i-1} \cdot \text{tg}(\alpha)] \end{array} \right\} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \gamma_{I, \max} + \left(\begin{array}{l} q_{i, \max} + \\ + q_{i-1, \max} \end{array} \right) \cdot \Delta x / 2. \quad (2)$$

Вес отсека, необходимый для определения удерживающих сил, определяем по формуле:

$$Q_{yd} = \left\{ \begin{array}{l} [y(x_i) - x_i \cdot \text{tg}(\alpha)] + \\ + [y(x_{i-1}) - x_{i-1} \cdot \text{tg}(\alpha)] \end{array} \right\} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \gamma_{I, \min} + \left(\begin{array}{l} q_{i, \min} + \\ + q_{i-1, \min} \end{array} \right) \cdot \Delta x / 2. \quad (3)$$

Здесь $tg(\alpha) = \frac{H}{L_1}$; $\cos(\alpha) = \frac{L_1}{\sqrt{L_1^2 + H^2}}$; $\sin(\alpha) = \frac{H}{\sqrt{L_1^2 + H^2}}$.

Сдвигающую отсек силу найдем по формуле:

$$T_{c\partial} = Q_{c\partial} \cdot \sin(\alpha). \quad (4)$$

Удерживающую отсек силу найдем по формуле:

$$T_{y\partial} = \left[N \cdot tg(\phi) + \frac{c}{\cos(\alpha)} \right] \cdot \Delta x = Q_{y\partial} \cdot \cos(\alpha) \cdot tg(\phi) + \frac{c}{\cos(\alpha)} \cdot \Delta x. \quad (5)$$

Коэффициент устойчивости сползающего массива грунта найдем как отношение удерживающих грунтовой массив сил к силам сдвигающим. Для этой цели используем формулу

$$k_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{i,y\partial}}{\sum_{i=1}^n T_{i,c\partial}}. \quad (6)$$

Наконец, оползневое давление найдем по формуле

$$E_{on}(x_i) = k_{уст} \cdot \sum_{j=1}^i T_{j,c\partial} - \sum_{j=1}^i T_{j,y\partial}. \quad (7)$$

Использование формул (6) и (7) для определения устойчивости откоса возможно только лишь в том случае, когда заранее известны проекции поверхности скольжения на координатные оси H и L_1 . Поскольку эти параметры неизвестны, для их определения следует использовать методы теории оптимизации, в частности, такой алгоритм.

1. Следует задаться **областью сканирования** (рис. 4). Обычно эта область определяется данными инженерно-геологических изысканий.
2. После этого необходимо задать шаг сканирования, например, $\Delta L_1 = 1$ м.
3. Далее задается семейство поверхностей скольжения (рис. 5) и для каждой из них определяется коэффициент устойчивости $k_{уст}$.
4. После этого находят минимальное значение коэффициента устойчивости $k_{уст}$ и соответствующую ему зависимость оползневого давления от координаты $E_{on}(x_i)$.

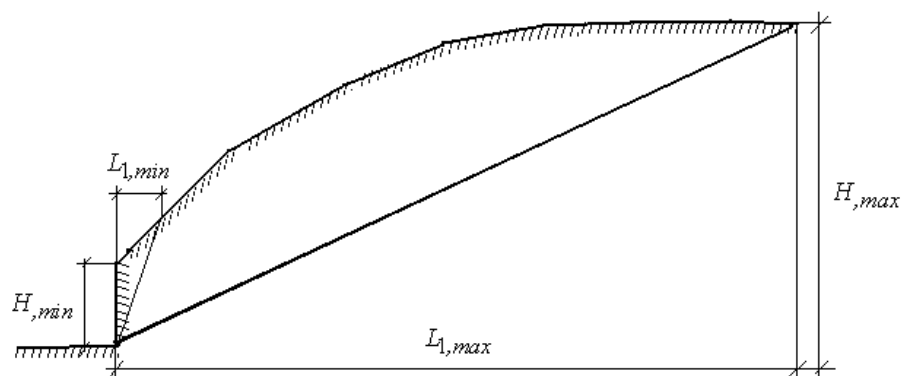


Рис. 4. К определению расчетной области

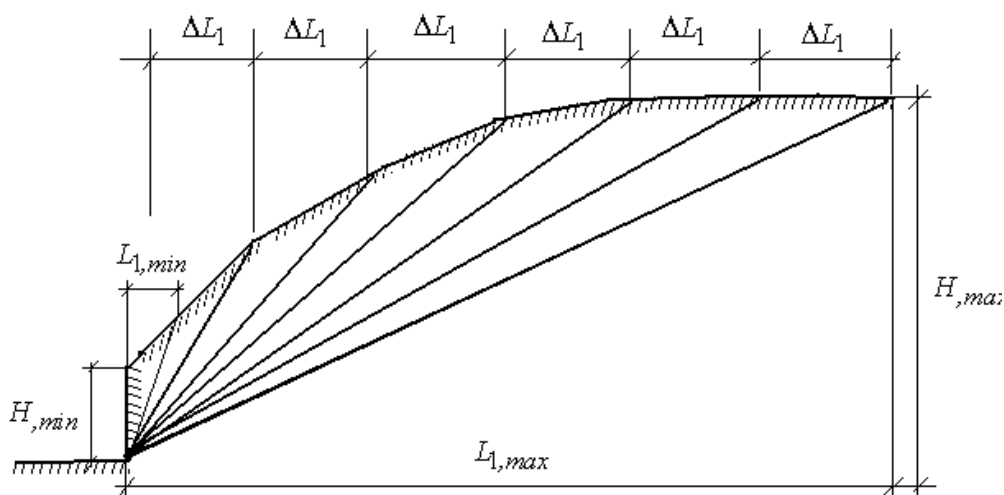


Рис. 5. К определению минимального значения коэффициента устойчивости

Данный алгоритм будет применен для всех последующих вариантов условий состояния грунтового склона.

4.3. Методика расчета устойчивости неводонасыщенного откоса при учете действия сейсмических сил

Для учета сейсмического фактора используем данные, полученные выше, применяя алгоритм.

Для определения коэффициента устойчивости водонасыщенного откоса при учете сейсмических сил в рамках гипотезы прямолинейной поверхности скольжения используем схемы, представленные на рисунках 2 и 3.

Воспользуемся полученными для условий неводонасыщения формулами определения веса отсека для сдвигающих и удерживающих сил (2) и (3) соответственно.

Сейсмический фактор для данного расчета будет учитываться в момент определения сдвигающей силы.

Сдвигающую отсек силу с учетом сейсмических сил находим по формуле:

$$T_{cd} = Q_{cd} \cdot \sin(\alpha) + \mu \cdot Q_{cd}, \quad (8)$$

где μ - коэффициент сейсмичности, который для оснований, представленных грунтами естественного сложения, следует принимать по таблице 1, а для оснований, представленных искусственными (насыпными) грунтами – по таблице 2.

Таблица 1. – Коэффициент динамичности μ для оснований естественной структуры

| Сейсмичность района в баллах | 1...6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Коэффициент μ | 0 | 0,02 5 | 0,05 0 | 0,10 0 | 0,25 0 | 0,50 0 | >0,7 50 |

Таблица 2. – Коэффициент динамичности μ для насыпных грунтов

| Сейсмичность района в баллах | 1...6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Коэффициент μ | 0 | 0,03 8 | 0,07 5 | 0,15 0 | 0,37 5 | 0,75 0 | >1,1 25 |

Удерживающую отсек силу, а затем коэффициент устойчивости и величину оползневого давления находим по формулам (5), (6), (7) соответственно с применением выведенного алгоритма.

4.4. Методика расчета устойчивости водонасыщенного откоса

Для определения коэффициента устойчивости водонасыщенного откоса в рамках гипотезы прямолинейной поверхности скольжения рассмотрим схему на рисунке 6.

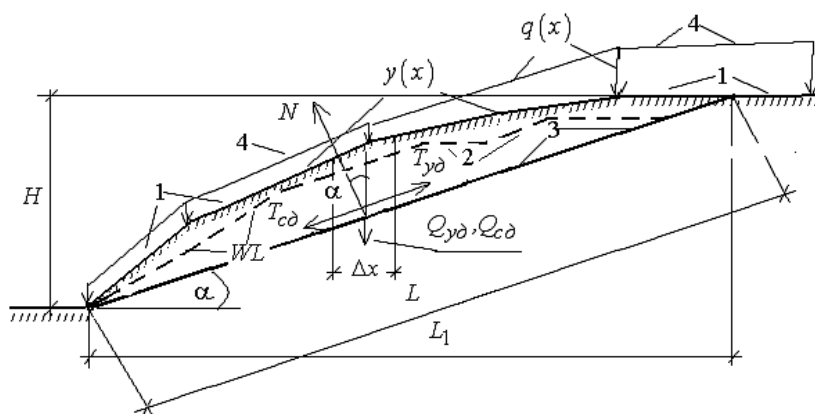


Рис. 6. К расчету устойчивости водонасыщенного откоса в рамках гипотезы прямолинейной поверхности скольжения.

- 1- дневная поверхность; 2- уровень подземных вод; 3- поверхность скольжения;
- 4 –внешняя нагрузка.

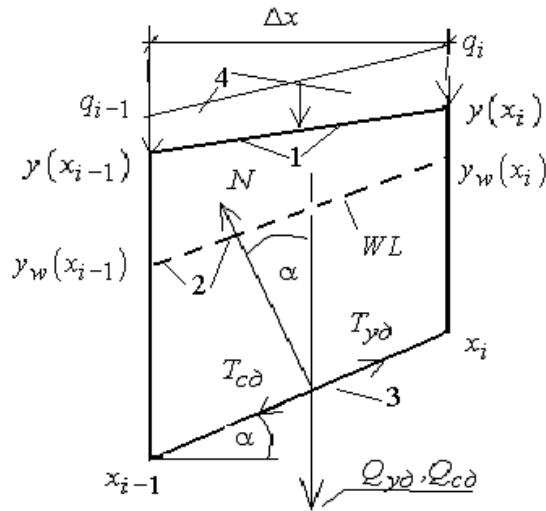


Рис. 7. К определению действующих внутри отсека сил.
 1- дневная поверхность; 2- уровень подземных вод; 3- поверхность скольжения;
 4 –внешняя нагрузка.

Вес отсека, необходимый для определения сдвигающих сил, находим по формуле:

$$\begin{aligned}
 Q_{cd} = & \left\{ \begin{aligned} & [y(x_i) - y_w(x_i)] + \\ & + [y(x_{i-1}) - y_w(x_{i-1})] \end{aligned} \right\} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \gamma_{I,max} + \\
 & + \left\{ \begin{aligned} & [y_w(x_i) - x_i \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] + \\ & + [y_w(x_{i-1}) - x_{i-1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] \end{aligned} \right\} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \gamma_{I,sat}^{max} + \\
 & + \left(\begin{aligned} & q_{i,max} + \\ & + q_{i-1,max} \end{aligned} \right) \cdot \Delta x / 2
 \end{aligned} \quad (9)$$

Вес отсека, необходимый для определения удерживающих сил, определяем по формуле:

$$\begin{aligned}
 Q_{y\delta} = & \left\{ \begin{aligned} & [y(x_i) - y_w(x_i)] + \\ & + [y(x_{i-1}) - y_w(x_{i-1})] \end{aligned} \right\} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \gamma_{I,min} + \\
 & + \left\{ \begin{aligned} & [y_w(x_i) - x_i \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] + \\ & + [y_w(x_{i-1}) - x_{i-1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] \end{aligned} \right\} \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \gamma_{I,sw}^{min} + \\
 & + \left(\begin{aligned} & q_{i,min} + \\ & + q_{i-1,min} \end{aligned} \right) \cdot \Delta x / 2
 \end{aligned} \quad (10)$$

Сдвигающую и удерживающую отсек силы найдем по формулам (4) и (5), а коэффициент устойчивости и оползневое давление – по формулам (6) и (7), следуя алгоритму.

4.5. Методика расчета устойчивости водонасыщенного откоса при учете сейсмических воздействий

Для определения коэффициента устойчивости водонасыщенного откоса в рамках гипотезы прямолинейной поверхности скольжения рассмотрим схемы (рис.6 и 7).

Далее находим вес отсека, необходимый для определения сдвигающих сил, и вес отсека, необходимый для определения удерживающих сил, по формулам (9) и (10). Сдвигаю-

щую и удерживающую силы находим по формулам (8) и (5), а коэффициент устойчивости и оползневое давление – по формулам (6) и (7) соответственно, используя алгоритм.

5. Выводы

В ходе данного исследования рассматривался метод прямолинейной поверхности скольжения для определения коэффициента устойчивости и величины оползневого давления.

Разработана модификация методики расчета устойчивости грунтовых откосов, позволяющая учитывать гидродинамические и сейсмические воздействия, а также максимальные и минимальные значения расчетных характеристик грунта.

С целью получения минимально необходимого коэффициента K_y устойчивости откоса необходимо задавать максимальную сдвигающую силу $T_{сд}$, для которой следует брать максимальный удельный вес γ_{max} , и минимальную удерживающую $T_{уд}$, для которой следует использовать минимальный удельный вес грунта γ_{min} соответственно.

Получены результаты модификации для условий:

1. неводонасыщенного откоса (подраздел 4.2);
2. неводонасыщенного откоса с учетом действия сейсмических сил (подраздел 4.3);
3. водонасыщенного откоса (подраздел 4.4);
4. водонасыщенного откоса с учетом действия сейсмических сил (подраздел 4.5).

Список литературы

1. Иванова М.С. Устойчивость оползневых склонов и способ определения его характеристик [Текст] : Сборник научных трудов. Вып. 11 / М.С. Петрунько. – Алчевск: ДГМИ, 2000. – 285 ..
2. Гинзбург Л.К. Противооползневые сооружения [Текст]. – Днепропетровск : ЧП "Лири ЛТД", 2007. – 188 с.
3. Справочник по механике и динамике грунтов [Текст] / В.Б. Швец, Л.К. Гинзбург, В.М. Гольдштейн [и др.]. – К. : Будівельник, 1987. – 232 с.
4. Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення [Текст] : ДБН В.1.1-3-97. – К.: Держбуд України, 1998. – 40 с.
5. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст] : ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К.: Мінбуд України, 2006. – 79 с.