

УДК 532.546; 622.02 (575)

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ И ОТКОСОВ

Бийбосунов Б.И.

д. физ.-мат. наук, профессор

Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева

Бишкек, Кыргызстан

Абдылдаев К. К.

к. т. н., профессор

Иссык-кульский государственный университет имени К. Тыныстанова

Каракол, Кыргызстан

Курманбек уулу Т.

к. т. н., доцент

Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева

Бишкек, Кыргызстан

Аннотация: В настоящей статье рассмотрены задачи расчета устойчивости склонов и откосов против возможного оползания, обрушения, осыпания и т.д. Как известно, при разработке месторождений полезных ископаемых, при проектировании гидротехнических сооружений (бетонные, земляные и каменные плотины, дамбы, перемычки и т.д.), укреплении берегов водохранилищ и многих подобных инженерно-технических задач, неизменно возникают вопросы устойчивости склонов и откосов. Предложена методика расчета устойчивости с учетом гидродинамических нагрузок, для определения которых формулируются и решаются краевые задачи динамики жидкости. Далее на основе геомеханических нагрузок предложена геомеханическая модель для определения неизвестной плоскости скольжения.

Ключевые слова: устойчивость склонов и откосов, коэффициент устойчивости, динамика жидкости, гидродинамические нагрузки, поверхность скольжения, геомеханические нагрузки, геомеханическая модель.

HYDRODYNAMIC AND GEODYNAMIC EVALUATION STABILITY OF SLOPES AND SLOPES

Biibosunov B.I.

Doctor of Physics & Math, Professor

Kyrgyz State University named after I. Arabaev

Bishkek, Kyrgyzstan

Abdyldaev K. K.

Candidate of Technical science, Professor

Issyk-kul State University named after K. Tynystanov

Karakol, Kyrgyzstan

Kurmanbek uulu T.

Candidate of Technical science, Associated Professor

Kyrgyz State University named after I. Arabaev

Biskek, Kyrgyzstan

Abstract: This article discusses the tasks of calculating the stability of slopes and slopes against possible sliding, caving, shedding, etc. As you know, in the development of mineral deposits, in the design of hydraulic structures (concrete, earthen and stone dams, dams, lintels, etc.), the strengthening of the banks of reservoirs and many similar engineering problems, invariably arise stability issues of slopes and slopes. A method for calculating stability is proposed taking into account hydrodynamic loads, for the determination of which the boundary-value problems of fluid dynamics are formulated and solved. Further, based on geomechanical loads, a geomechanical model is proposed for determining the unknown slip plane.

Key words: stability of slopes and slopes, stability coefficient, fluid dynamics, hydrodynamic loads, sliding surface, geomechanical loads, geomechanical model

Введение.

В научной литературе, посвященной вопросам устойчивости, имеется большое количество различных методов и методик расчета устойчивости для

Метод прислоненного откоса. Один из самых распространенных методов, применяемых на практике. Основная суть расчета устойчивости по данному методу заключается в следующем. Откос, прислоненный к материнской породе, разбивается на ряд призм и рассматривается равновесное состояние каждой призмы с учетом бокового давления грунта [2], [3]. При этом расчет устойчивости откосов и склонов начинается с первого верхнего элемента призмы (см. рис. 2). В процессе расчета коэффициент запаса устойчивости определяют методом подбора таким образом, чтобы давление самого нижнего отсека $E_n = 0$. Критерием устойчивости откосов и склонов является следующее условие: если все элементы устойчивы, то откос устойчив. В противном случае устойчивость нарушается и необходимы специальные мероприятия и работы по сохранению устойчивости. Для вычисления давления E_i применительно к каждому отсеку (по принципу «сверху» - «вниз») используются следующие известные формулы:

$$R_i = N_i + E_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i) - E_{i-1} \cdot \sin(\alpha_i - \beta_{i-1}) \quad (2)$$

$$T_i = c_i \cdot l_i + R_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i) - E_{i-1} \cdot \cos(\alpha_i - \beta_{i-1}) \quad (3)$$

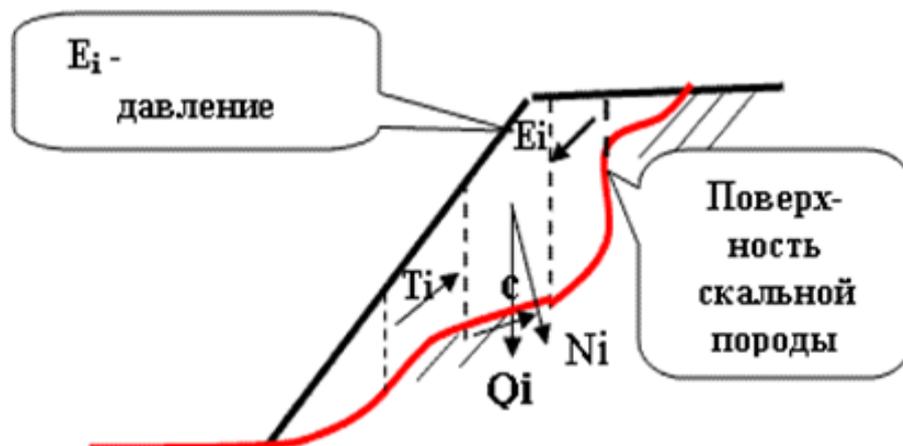


Рис. 2. Расчётная схема метода прислонённого откоса.

Цель исследования.

В данной статье мы исследуем задачи расчета устойчивости склонов и откосов с учетом динамики жидкости в склонах и откосах. С этой целью формулируются и решаются начально-краевые задачи подземной гидродинамики. С учетом гидродинамических нагрузок предложена методика расчета коэффициента устойчивости склонов и откосов.

Во второй части статьи формулируется задача устойчивости склонов и откосов с учетом теперь уже геомеханических нагрузок. На основе этого предложена геомеханическая модель, которая позволяет определить неизвестную плоскость скольжения в склонах и откосах при потере устойчивости.

Материал и методы исследования.*Расчет устойчивости с учетом гидродинамического давления.*

Как известно, при исследовании устойчивости откосов и склонов необходимо учитывать воздействие изменяющихся метеорологических и гидрогеологических факторов. Указанные факторы определяют во многом гидродинамические процессы в склонах и откосах. Как мы знаем, при расчете фильтрационных течений подземных вод в грунтовых массивах и для нахождения линии или плоскости скольжения принимаются во внимание следующие возможные случаи:

- 1) Если плоскость скольжения расположена выше уровня подземных вод, следовательно, динамика жидкости в данном случае не оказывает заметного воздействия на коэффициент устойчивости;
- 2) Если плоскость скольжения расположена ниже уровня поднятия и колебания подземных вод, тогда гидродинамические воздействия существенно влияют на устойчивость;
- 3) Если поверхность скольжения расположена непосредственно в зоне подземных вод, то есть фильтрационных течений, тогда коэффициент устойчивости будет во многом определяться гидродинамическим давлением.

Разберем действие фильтрационного давления для случая наклонного пласта грунта, залегающего параллельно водоупору (рис. 4). Этот случай имеет практическое значение, так как весьма часто встречается в инженерных задачах об устойчивости склонов и откосов [4].

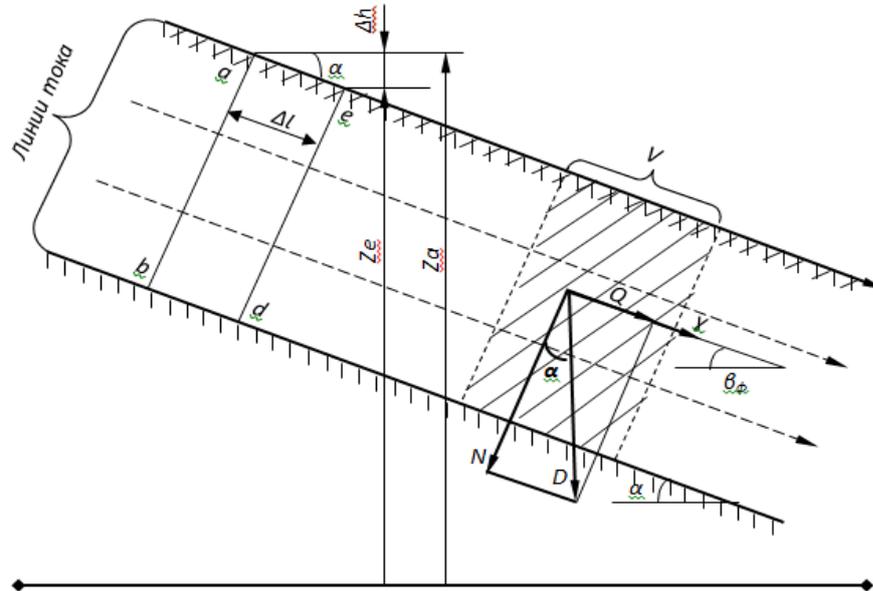


Рис. 4. Схема расчета устойчивости с учетом гидродинамических нагрузок

Гидродинамическое давление на единицу объема грунта равно градиенту (разности напоров на единицу длины, т.е. объему столба воды), умноженному на удельный вес воды:

$$j_{\text{един.}} = i\gamma_{\omega} = \gamma_{\omega} \sin \beta_{\varphi} \quad (7)$$

Общее давление на некоторый слой грунта объемом V будет равно:

$$j = Vj_{\text{един.}} = V\gamma_{\omega} \sin \beta_{\varphi} = V\gamma_{\omega} \sin \alpha \quad (8)$$

Это давление направлено вдоль линий тока, параллельно поверхности откоса и является сдвигающей силой.

Пусть поверхностью скольжения является кровля водоупора. Собственный вес грунта в объеме V с учетом взвешивания будет равен:

$$P_C = (\gamma - \gamma_{\omega})V.$$

Сдвигающая составляющая этого веса Q также направлена вдоль откоса вниз и равна:

$$Q = P_C \sin \alpha ,$$

а нормальная к поверхности скольжения составляющая равна:

$$N = P_C \cos \alpha .$$

Таким образом:

$$Q = (\gamma - \gamma_w)V \sin \alpha; N = (\gamma - \gamma_w)V \cos \alpha . \quad (9)$$

Коэффициент устойчивости склона для слоя объемом V будет равен:

$$\begin{aligned} K_y &= \frac{Q + j}{N \operatorname{tg} \phi} = \frac{(\gamma - \gamma_w)V \sin \alpha + V \gamma_w \cdot \sin \alpha}{(\gamma - \gamma_w)V \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi} = \\ &= \frac{\gamma \sin \alpha}{(\gamma - \gamma_w)V \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi} = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \phi} \end{aligned} \quad (10)$$

При отсутствии фильтрационного и взвешивающего давлений этот коэффициент был бы равен:

$$K_y = \frac{Q}{N \operatorname{tg} \phi} = \frac{\gamma V \sin \alpha}{\gamma \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \phi} \quad (11)$$

Следовательно, при насыщении откоса водой коэффициент устойчивости снижается в

$$\frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \text{ раз,}$$

то есть во столько раз, во сколько вес скелета грунта в воздухе больше веса скелета с учетом взвешивания в воде.

Итак, запас устойчивости откосов и склонов характеризуется коэффициентом устойчивости $K_{уст}$:

$$K_y = \frac{\sum F_{уд.}}{\sum F_{сд.}} \quad (12)$$

где $F_{сд}$ - силы сдвигающие, а $F_{уд}$ – силы удерживающие.

Сумма сдвигающих сил будет представлена, во-первых, величиной гидродинамического давления (P), во-вторых, силой тяжести (G). Сумма удерживающих сил состоит: из силы сцепления и силы внутреннего трения. Тогда значение коэффициента запаса устойчивости $K_{уст}$ вычисляется по формуле:

$$K_y = \frac{F_r}{G + P} \quad (13)$$

Здесь F_r - сила сопротивления сдвигу (сумма удерживающих сил сцепления и внутреннего трения). В свою очередь, сдвигающая сила тяжести представляется в виде 2-х векторов: тангенциальным и нормальным составляющими, значения которых вычисляются по формуле:

$$T = G \cdot \sin \alpha, \quad N = G \cdot \cos \alpha, \quad F_r = -K_0 \cdot G \cdot \cos \alpha, \quad K_0 = \operatorname{tg} \varphi, \quad (14)$$

где α - угол наклона откоса или склона; K_0 – величина коэффициента сдвига, которая вычисляется как сумма коэффициентов сцепления и внутреннего трения.

На основе формул (13) и (14) можно сформулировать следующие два критерия:

$$\text{а) } P < F_r - G \qquad \text{б) } P > F_r - G \quad (15)$$

При выполнении условия а) из формулы (15) устойчивость сохраняется; при выполнении условия б) из формулы (15) устойчивость нарушается.

Отметим, что для расчета неизвестного гидродинамического давления требуется постановка и решение краевой или начально-краевой задачи, состоящей из уравнения нестационарной фильтрации и соответствующих начальных и граничных условий [5]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - K(x, y) \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = 0 \quad (16)$$

где H - фильтрационный напор, посредством которого выражается функция давления по общеизвестному соотношению; $K(x, y)$ – заданный коэффициент фильтрации (в случае однородно-изотропной среды он считается константой).

Собственный вес грунтового массива вычисляется посредством постановки и решения задачи инфильтрации жидкости в виде уравнения влагопереноса относительно функции влажности:

$$\frac{\partial W}{\partial t} - D_0 \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + K_0 \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

где W - влажность грунта, которая как функция имеет две составляющие: влажность грунта при естественном или ненасыщенном состоянии, и влажность в случае полного насыщения:

$$W = W_{ест.} + W_n.$$

где D_0 и K_0 - коэффициенты диффузии и влагопроводности, которые в целом принято называть коэффициентами процесса влагопереноса.

На основе вышеизложенного для определения запаса устойчивости применим нижеследующие соотношения:

$$K_y = \frac{(G_1 + G_2) \cdot \sin \alpha + H_0 \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \sin \alpha}{(G_1 + G_2) \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi} \quad \text{или} \quad K_y = \frac{(G_1 + G_2 + I)}{(G_1 + G_2)} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (18)$$

Здесь сила I связана с давлением (фильтрационный напор):

$$I = H_0 \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$$

где $G_1 = \gamma_e \cdot W_e \cdot D_1 \cdot l$ - вес при естественной насыщенности грунта; W_e - влажность грунта естественной насыщенности; W_n - влажность при полном насыщении; $G_2 = \gamma_n \cdot W_n \cdot D_2 \cdot l$ - вес для полного насыщения грунта; γ_e - объемный вес при естественном насыщении рыхлообломочного слоя; γ_n - объемный вес при полном насыщении; значения D_1, D_2 – толщина слоев грунтового массива.

Таким образом, разработана численная методика, включающая схему расчета запаса устойчивости откосов и склонов, и учитывающая возможные гидродинамические силы и нагрузки.

Определение неизвестной поверхности скольжения для откосов.

Следующий этап нашей работы, посвященный вопросам устойчивости склонов и откосов, включает в себя постановку задачи по нахождению вероятностной линии или поверхности скольжения при возможном их обрушении. Итак, задача заключается в разработке математической модели, которая дает возможность определить неизвестную границу скольжения в геодинамической постановке.

В качестве практического примера выступает напряженно-деформированное состояние прибортового анизотропного массива известного месторождения «Макмал» в Кыргызстане.

Как правило, на начальной стадии проводится схематизация изучаемых процессов и основных свойств горных и грунтовых массивов на основе данных наблюдений. На базе этого этапа и по результатам схематизации можно формулировать геомеханическую модель, которая с достаточной степенью достоверности будет отражать действительную природу происходящих в горных массивах геомеханических процессов [6], [7].

При физической и математической постановке задачи для двумерного случая определяется неизвестная линия скольжения, ее форма и местоположение. При пространственной или трехмерной постановке задач определяется неизвестная поверхность скольжения, ее форма и местоположение. При этом в теории и практике, как известно, выделяют следующие основные типы возможной или вероятностной поверхности скольжения.

Во-первых, поверхность скольжения как результат слабости массива под воздействием геологических условий, структуры и нарушенности пород, то есть так называемая естественная поверхность скольжения.

Во-вторых, в процессе разрушения горных и грунтовых массивов может образоваться так называемая гипотетическая или расчетная поверхность скольжения, причем, ее форма и местоположение будет зависеть от механизма разрушения самого массива.

В-третьих, выделяют тип комбинированных поверхностей скольжения, которые могут возникнуть как результат частичных сдвигов как по естественной поверхности, так и по новой образованной.

Итак, моделирование неизвестной поверхности (как реальной, так и потенциально возможной) скольжения опирается на конкретные данные по свойствам и условиям инженерно-геологического объекта. При последующих этапах решения необходимо обеспечить достоверность и корректность применяемых расчетных схем устойчивости склонов и откосов путем их соответствия теории предельного равновесия. Далее приведем результаты нашего исследования по выше приведенной методологии: анализ геологических условий и свойств массива, разработка геомеханической модели, формирование расчетных схем и моделей, численное решение построенных моделей.

Как отмечено в работах [7], [8] на практике для случаев неоднородных массивов могут возникать всевозможные поверхности контактов внутри пород. Такие контактные поверхности при определенных условиях предстают поверхностями скольжения при обрушении и оползании бортов карьеров.

Как правило, при таких исследованиях структуры пород в силу возникающих сложностей зачастую ограничиваются нахождением элементов залегания поверхностей контактов для отдельно взятых точек. На сегодняшний день в развитых странах применяются новые 3D сканеры и лазерно-цифровые технологии. Таким образом, в горной практике появилась возможность проведения всех необходимым изыскательских работ с применением 3D сканирования и представления изучаемых объектов в цифровом виде. В результате примене-

ния указанных технологий можно строить и создавать цифровые пространственные или трехмерные модели объектов с необходимыми наборами всех его пространственных координат.

Итак, основываясь на анализе научной литературы, была разработана и решена следующая геомеханическая модель, которая учитывает неоднородность строения и сложную структурированность откосов.

На рис. 5 показаны результаты решения построенной геомеханической модели. При решении задачи были введены и приняты обозначения:

- а) первая зона (I) описывает область простирающаяся крупнозернистой гранитной структуры;
- б) вторая зона (II) описывает область, занятую мраморизованным известняком;
- в) третья зона (III) это область, занятая гранитами - порфирами;
- г) четвертая зона (IV) представляет собой структуру мраморной брекчии;
- д) пятая зона (V) представлена мраморизованным известняком.

Особо отметим, что построена получившая широкое распространение геомеханическая модель, которая основана на необходимом условии достижения одновременного предельного равновесия по всей поверхности скольжения. При формулировке и построении нашей модели все основные входные данные, описывающие физико-механические свойства пород, были получены в результате проведенных нами лабораторных работ и натурных испытаний.

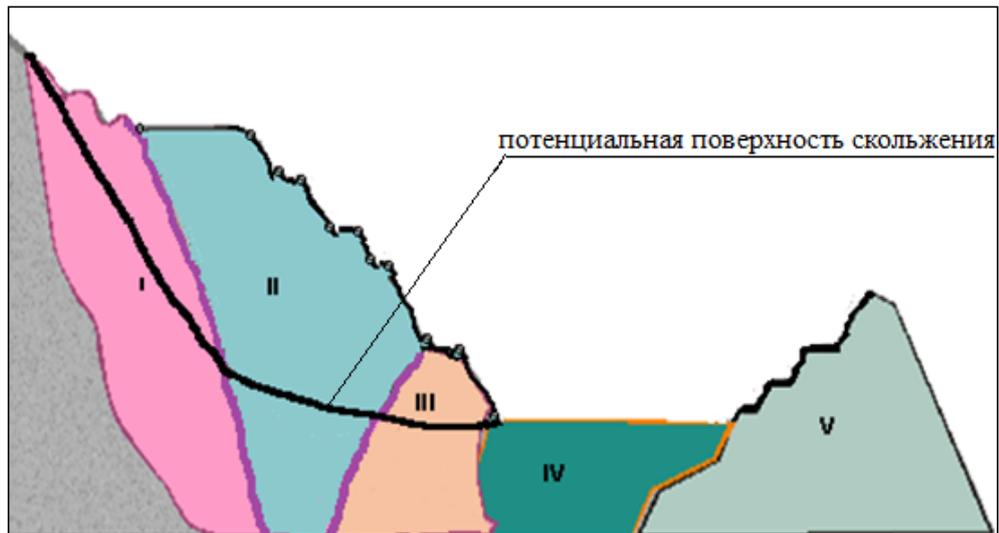


Рис. 5. Геомеханическая модель для расчета устойчивости откосов.

Заключение

Рассмотрена задача по расчету устойчивости склонов и откосов как с позиции теории и методов гидродинамики, так и с позиции напряженно-деформированного состояния склонов и откосов. На основе анализа системы «грунт – жидкость» естественно вытекает, что динамика жидкости влияет на устойчивость грунтовых массивов, приводит их к нарушению равновесного состояния и потере устойчивости. В результате расчета фильтрационных и инфильтрационных процессов в склонах и откосах, разработана численная методика, включающая схему расчета запаса устойчивости и учитывающая возможные гидродинамические силы и нагрузки.

Далее рассмотрена задача устойчивости с учетом геомеханических нагрузок и на практическом примере месторождения «Макмал» предложена геомеханическая модель, которая позволяет определить неизвестную плоскость скольжения в склонах и откосах.

Библиографический список:

1. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии [Текст] / Н.Н. Маслов. - М.: Высшая школа, 1968. – 631 с.

2. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов [Текст] / И.В. Федоров - М.: Госстройиздат, 1962. – 125 с.
3. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы [Текст] / Н.М. Герсеванов. – М: ОНТИ, 1937. – 242 с.
4. Шустер, Р. Оползни. Исследование и укрепление [Текст] / Р. Шустер, Р. Кризек. –М. Мир: 1981. – 368 с.
5. Полубаринова – Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод [Текст] / - П.Я. Полубаринова - Кочина. М.: Наука, 1977. – 664 с.
6. Абдылдаев К.К. Геомеханическая модель неоднородных прибортовых массивов сложноструктурных месторождений [Текст] / К.К. Абдылдаев, К.Ч. Кожогулов, Т. Курманбек уулу // Горная промышленность. - Москва, 2016. - № 6 (130). - С.86-87.
7. Галустян Э.Л. Геомеханика открытых горных работ. Справочное пособие [Текст] / Э.Л. Галустян. -М.: Недра, 1992. – 272 с.
8. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов [Текст] / Г.Л. Фисенко. -М., 1965. – 378 с.

Оригинальность 85%