

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧНОСТИ РЕГИОНА

**С.Ф. Усманов** – канд. техн. наук, доц.

В статье приводится методика оценки устойчивости бортов карьеров на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния породного массива. Учет сейсмического воздействия землетрясения – очень важная задача для Кыргызстана. Моделирование выполняется методом конечных элементов. В результате расчетов можно получить коэффициент запаса устойчивости в процессе землетрясения.

*Ключевые слова:* борт карьера, коэффициент устойчивости, метод конечных элементов, сейсмическое воздействие, землетрясение, волновые процессы.

Горнотехнические сооружения в процессе их эксплуатации находятся под постоянным воздействием разнообразных видов нагрузок, влияющих на их устойчивость. Наиболее существенными из них являются статические гравитационные нагрузки под действием веса пород и динамические нагрузки, возникающие при проведении массовых взрывов и при природных землетрясениях.

Для карьеров, разрабатываемых в сейсмически активных районах, важное значение приобретает проблема влияния на устойчивость природных сейсмических воздействий. Разработка месторождений в условиях высокогорья должна предусматривать возможное сейсмическое воздействие природного землетрясения.

Кыргызстан находится на территории большой горной гряды Тянь-Шаня в сейсмически

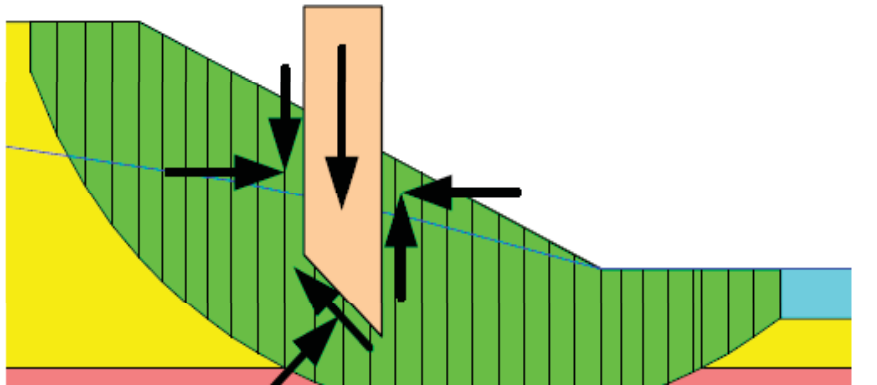


Рис. 1. Силы, действующие на блок.

активной зоне. В связи с этим проектировать любое сооружение (гидротехническое, строительное, геотехническое) нельзя без учета сейсмического воздействия и установления запаса сейсмической устойчивости. За последние 120 лет на территории Кыргызстана и соседних государств произошли сильные катастрофические землетрясения силой 8–10 баллов. Среди них следует отметить: Беловодское 1885 г., Верненское 1887 г., Чиликское 1889 г., Кеминское 1911 г., Байсоорунское 1990 г., Кочкоратинское 1992 г., Суусамырское 1992 г., Кош-Добенское 1997 г. и др.

В настоящее время по геологическим и сейсмогеологическим данным Института сейсмологии Академии наук Кыргызской Республики выделены сейсмогенерирующие зоны, способные создавать очаги землетрясений с максимальной магнитудой, превышающей 8 баллов.

Следовательно, исследованию сейсмического воздействия тектонических процессов на распределение напряженно-деформированного состояния горного массива необходимо уделять особое внимание.

В строительной практике вопрос сейсмостойкости проектирования достаточно хорошо изучен. В геотехнологии учет сейсмичности региона еще требует значительного научного и практического исследования.

В аналитических расчетах, основанных на теории предельного равновесия, определение запаса устойчивости сейсмическое воздействие учитывается псевдостатическим методом<sup>1</sup>. Как известно, в аналитическом методе расчета область потенциального скольжения разбивается

на блоки. Рассматриваются условия предельного равновесия каждого блока, затем определяется общая устойчивость системы (рис. 1).

В псевдостатическом методе эффект землетрясения представляется ускорением, которое создается инерционными силами. Эти силы действуют в центр тяжести блока в вертикальном и горизонтальном направлениях (рис. 2).

Определяются псевдосейсмические силы следующим образом:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W, \quad (1)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W,$$

где  $a_h$  и  $a_v$  – горизонтальные и вертикальные псевдостатические ускорения,  $g$  – ускорение свободного падения,  $W$  – вес блока.

Отношение  $a/g$  можно представить безразмерным коэффициентом  $k$ . В программных пакетах Slope/W и Stress сейсмический эффект создается коэффициентами  $k_h$  и  $k_v$ .

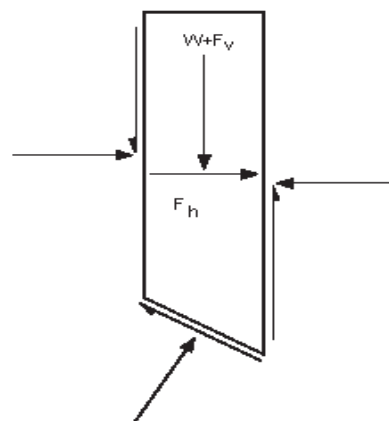


Рис. 2. Псевдосейсмические силы, действующие на блок.

<sup>1</sup> Dynamic Modeling with QUAKE/W. An Engineering Methodology. GEO-SLOPE International Ltd. – Canada, 2007.

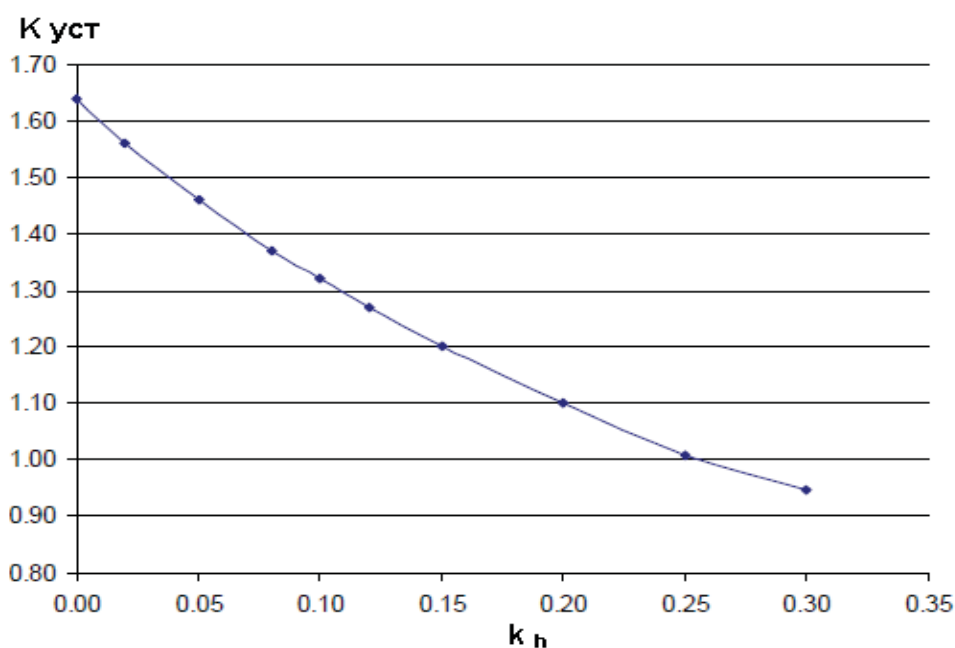


Рис. 3. Зависимость коэффициента запаса устойчивости от горизонтальной составляющей псевдосейсмической нагрузки.

Горизонтальная составляющая сейсмической нагрузки оказывает большее влияние на устойчивость горного склона, чем вертикальная (рис. 3).

Установлено, что горизонтальная составляющая псевдосейсмической нагрузки имеет значительный эффект на запас устойчивости.

Одним из способов учета сеймики является численное моделирование напряженно-деформированного состояния. К наиболее развитым в математическом описании и программной реализации относится метод конечных элементов. Он позволяет учитывать различные виды нагрузок, неоднородную структуру массива, различные геомеханические модели деформации и разрушения. Используя принцип суперпозиции наложения нагрузок, можно получить наиболее полную и достоверную картину напряженно-деформированного состояния горного массива. В данной работе излагается методика учета действия сейсмических колебаний земной коры.

В рамках работы лаборатории «Геоинформатики» Кыргызско-Российского Славянского университета разработан программный комплекс Stress для численного моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов. В результате сотрудничества с университетом Альберты (Эдмонтон, Канада) был приобретен

программный комплекс конечно-элементного анализа Geo-Slope Office компании Geo-Slope International Ltd. Этот комплекс получил широкое распространение в научной и инженерной практике проектирования геотехнических сооружений. Обе программы Stress и Geo-Slope имеют открытый интерфейс, что позволяет результаты одной программы использовать как исходные данные для другой.

Целью данной работы является получение модели напряженно-деформированного состояния горного массива под действием сейсмического возмущения.

Моделирование выполнялось в два этапа:

На первом определяли напряженно-деформированное состояние в статической постановке задачи. Расчет выполнен по программе Stress.

На втором проведен расчет динамического воздействия сейсмической нагрузки на горный массив по системе Quake-W из комплекса Geo-Slope.

Расчет выполняли для однородного откоса высотой 10 м. В принципе, в данной работе представлена методика, расчеты с реальными массивами планируется провести в дальнейших исследованиях. Физико-механические свойства приняты следующие: модуль Юнга 10 000 МПа, коэффициент Пуассона -0.334, объемный

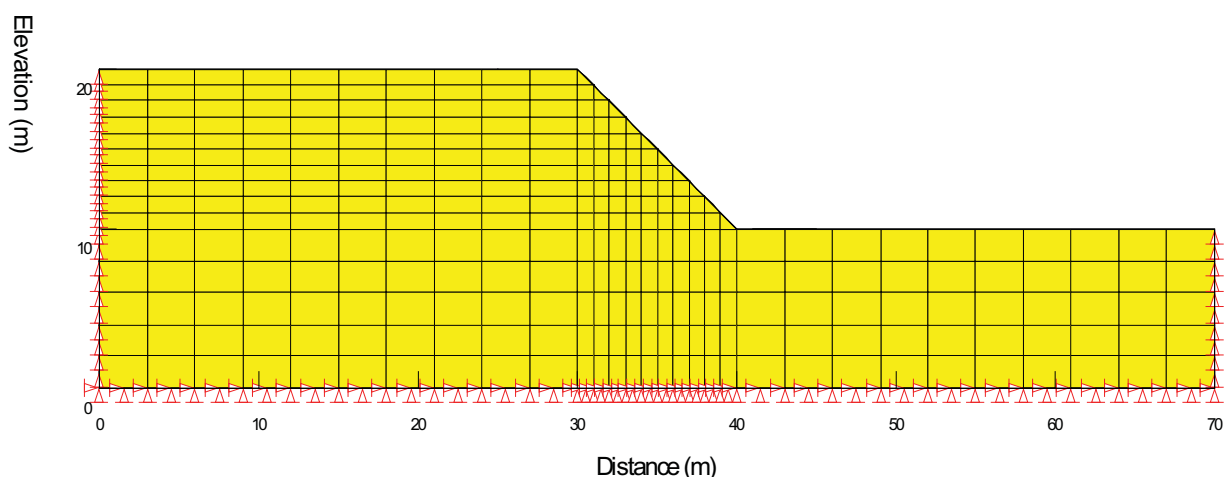


Рис. 4. Сетка конечных элементов и граничные условия.

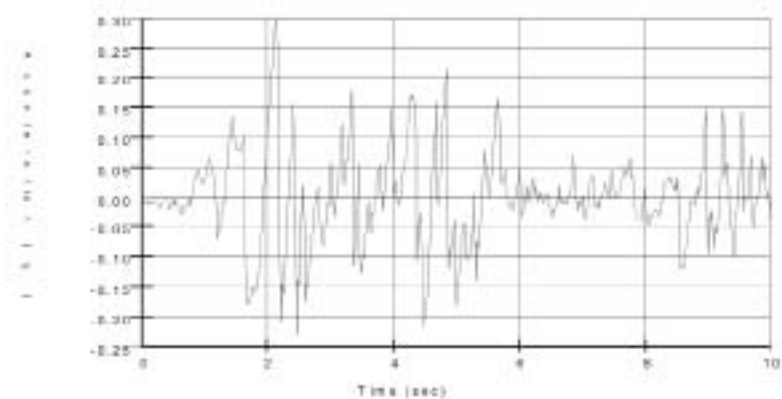


Рис. 5. Сейсмограмма прикладываемой нагрузки.

вес –  $2.5 \text{ г/см}^3$ , На рис. 4 представлена конечно-элементная сетка и граничные условия.

Данные по сейсмическим нагрузкам можно найти во многих источниках, представленных в Интернете. Например, Геологическая Служба Соединенных Штатов Америки регулярно публикует сейсмограммы большинства землетрясений, происходящих в мире (<http://nsmp.wr.usgs.gov>). На территории Кыргызстана также установлены сейсмические станции, представляющие информацию в эту организацию. К сожалению, нет единого формата представления числовых данных по сейсмограммам, поэтому необходимы программы преобразования данных в требуемый формат.

Сейсмическая нагрузка прикладывается в виде заданных ускорений во времени (рис. 5).

Очень важным моментом моделирования является визуализация напряженно-деформированного состояния. Современное программное обеспечение позволяет выводить распределение напряжений или деформаций по любой компоненте. На рис. 6 представлено распределение касательных напряжений с интервалом времени 2 с. В начальный момент времени массив нагружен собственным весом.

Устойчивость горнотехнического сооружения в значительной мере определяется амплитудой смещения. Сейсмическое возмущение в основном вызывает горизонтальное смещение. На рис. 7 изображены два предельных состояния откоса в первую и шестую секунду колебаний. Через 10 с массив возвратился в исходное состояние.

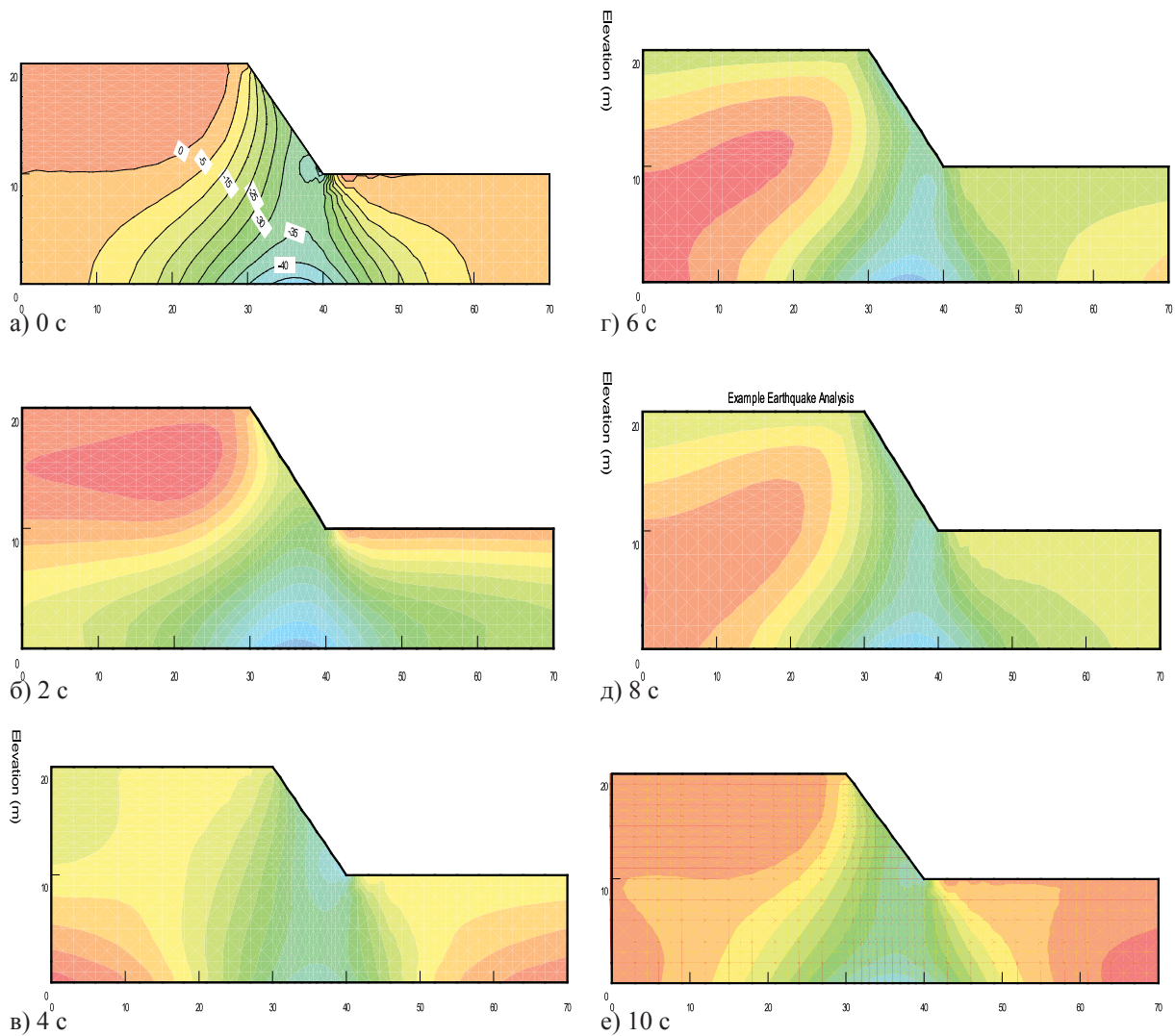


Рис. 6. Распределение касательных напряжений по времени

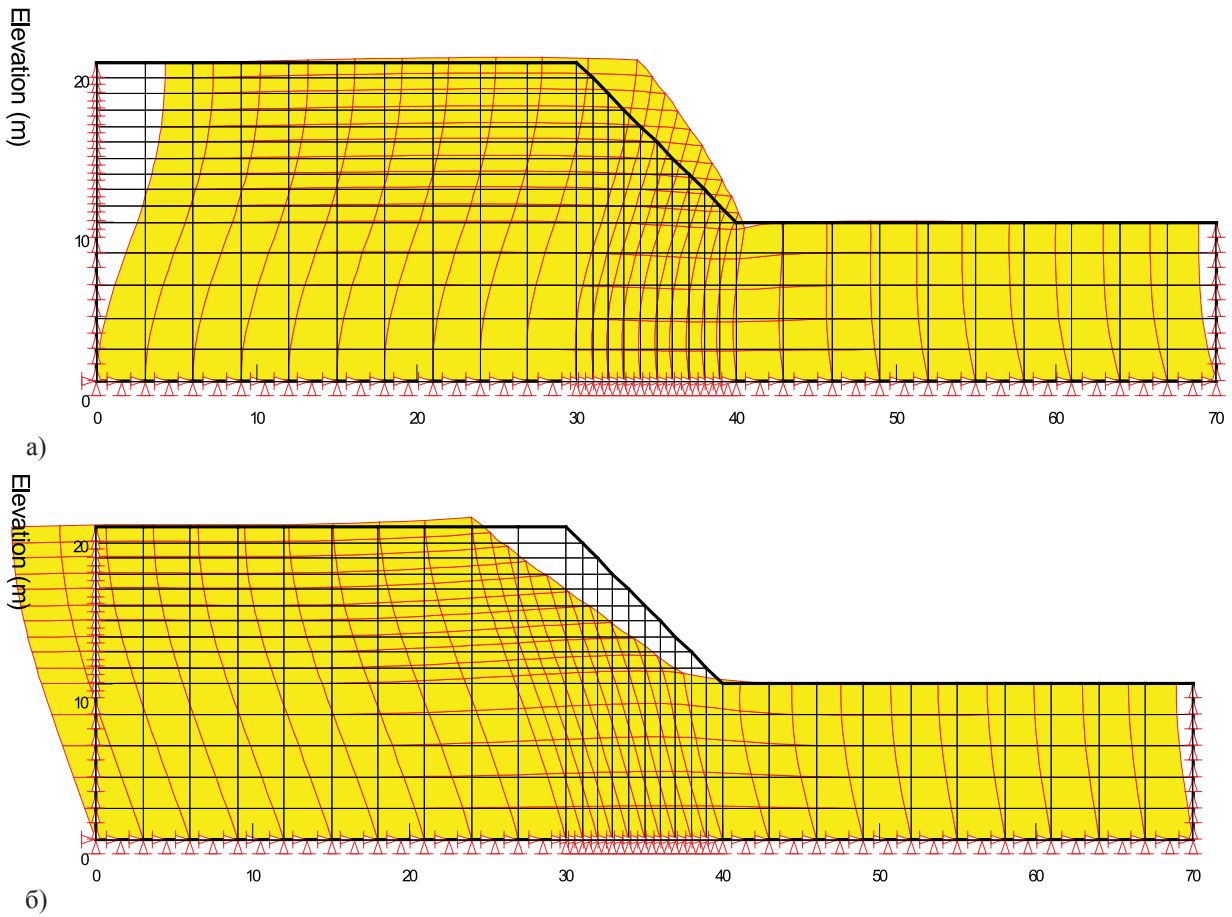


Рис. 7. Смещения откоса: а – 1 с; б – 6 с



Рис. 8. Смещения вершины откоса во времени.

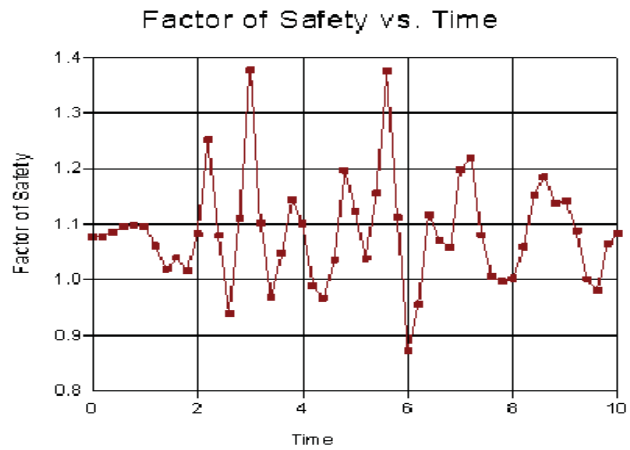


Рис. 9. Изменение коэффициента запаса устойчивости во времени.

---

Смещение вершины откоса во времени представлено на рис. 8, изменение коэффициента устойчивости во времени – на рис. 9.

Как видно, коэффициент устойчивости в определенные моменты времени может быть

меньше единицы, но откос в целом остается устойчивым.

Более полная картина напряженно-деформированного состояния борта карьера под воздействием сейсмического возмущения может быть получена при трехмерном моделировании.