

СЕЙСМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДАМБ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ВОЗВОДИМЫХ ПО МЕТОДУ ВЕРХНЕГО БЬЕФА

Чукин Б.А., Чукин Р.Б., Ким Э.А.

ИГиОН НАН КР

В связи с быстрым наполнением хвостохранилища горнодобывающего комплекса Иштамберды необходимо было произвести наращивание пионерной дамбы.

На первом этапе дамба обвалования первой очереди наращивания соответствовала проектным решениям и имела высоту 3 метра, заложение верхового и низового откосов 1:1.5 при ширине гребня 4 метра.

На втором этапе Заказчик увеличил высоту дамбы обвалования первой очереди наращивания до 5 метров. Заложение низового откоса составило 1:1. Наращивание дамбы до 5 метров привело к тому, что часть основания дамбы обвалования расположилась на гребне пионерной дамбы. При этом, основание частично вышло за пределы узла крепления пленочного экрана на гребне пионерной дамбы. Тем самым, появилась потенциальная возможность формирования пути фильтрации, в результате чего может произойти водонасыщение тела пионерной дамбы при дальнейшем наполнении хвостохранилища, что снизит общую устойчивость пионерной дамбы. Процесс водонасыщения пионерной дамбы подтвердили и фильтрационные расчеты. На рис.1. показана картина водонасыщения пионерной дамбы, когда уровень

воды в прудке находится ниже уровня гребня 5-ти метровой дамбы обвалования первой очереди наращивания на 30 см.

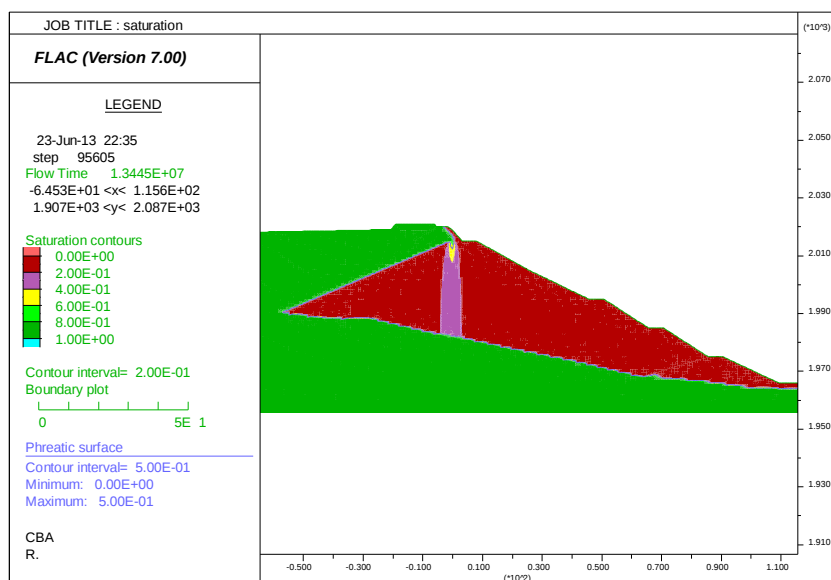


Рис. 1- Картина водонасыщения пионерной дамбы, когда уровень воды ниже уровня гребня дамбы обвалования первой очереди на 30 см.

Опасение вызывает устойчивость дамб обвалования при землетрясении. Район строительства относится к зоне 9-ти балльной интенсивности. При сейсмическом воздействии пульпа способна разжижаться, что приведет к потере устойчивости дамб обвалования и, как следствие, - к развитию гидродинамической аварии. Явление разжижения грунтов возможно выявить на основании численного моделирования.

Отмечаем, что в КР действуют «Межгосударственные строительные нормы. Гидротехнические сооружения. Основные положения. МСН 3.04.-01-2005» [1]. Если определить класс по высоте пионерной дамбы (35 м), тогда класс дамбы можно принять вторым. Требования к оценке сейсмической устойчивости гидротехнических сооружений, отнесенных к I и II классу, необходимо производить по прямому динамическому методу, согласно СНиП КР 20-02:2009 «Сейсмостойкое строительство» [2].

Для анализа сейсмической устойчивости дамбы было выбрано типовое расчетное сечение, состоящее из 3-х метровой дамбы обвалования второй очереди наращивания и 5-ти метровой дамбы обвалования первой очереди наращивания с укреплением низового откоса стенкой из габионов. Отметка гребня 3-х метровой дамбы обвалования второй очереди наращивания 2023.0 м

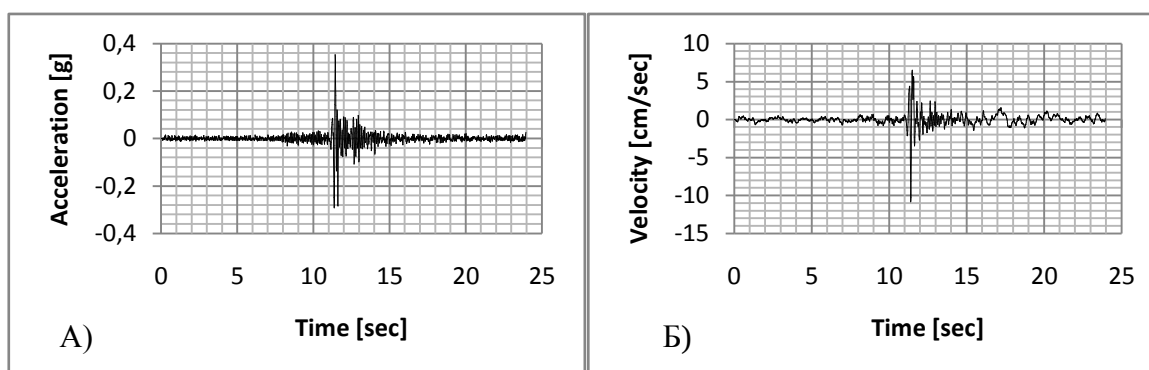
Динамические свойства грунтов определены по формулам, включающих в себя скорости прохождения продольных и поперечных волн, а также плотность материала.

$$C_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (1)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (2)$$

где C_p – скорость прохождения продольной волны; C_s – скорость прохождения поперечной волны; K – динамический модуль упругости объемных деформаций; G – динамический модуль упругости.

Для анализа сейсмической устойчивости дамбы хвостохранилища Иштамберды была выбрана запись акселерограммы «Суусамырского» землетрясения (Кыргызская Республика, Суусамыр, 7 сентября 1992 года, магнитуда афтершока 4.2). Землетрясение «Суусамыр» имеет пиковое ускорение порядка 0.35 g, расчетная пиковая скорость приближается к 11 см/сек, продолжительность 24 сек. На рис.2 представлены записи ускорений, скорости, смещений и спектр Фурье компоненты скорости.



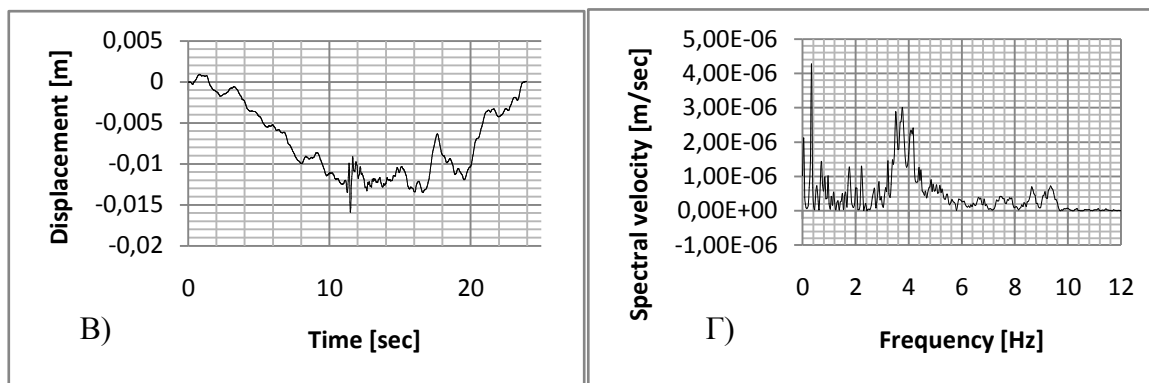


Рис. 2 - Запись землетрясения «Суусамыр»: А) ускорения, Б) скорости, В) смещения, Г) спектр Фурье компоненты скорости.

Большая часть энергетического спектра скорости содержится в среднечастотном диапазоне, но также есть и высокочастотная компонента с хорошо выраженным энергетическим спектром от 8 до 10 Гц. Таким образом, анализ сейсмической устойчивости дамбы хвостохранилища Иштамберды осуществляется при высоко-, средне- и низкочастотных диапазонах скоростей сейсмического воздействия.

Район строительства дамбы Иштамберды, согласно утвержденной «Карте сейсмического районирования Кыргызской Республики», отнесен к 9-ти балльной зоне интенсивности с повторяемостью 1 раз в 500 лет. Возможное пиковое ускорение для таких зон составляет порядка 0.4g. Для решения задачи ввода необходимого сейсмического воздействия, прикладываемого к основанию модели, необходимо осуществить подбор «заданного» пикового ускорения на естественной поверхности при прохождении сейсмических волн через скальное основание дамбы. Для этого были произведены предварительные расчеты. Данный процесс подбора называется деконволюцией. Полученные в результате деконволюции ускорения на поверхности скального основания показаны на рис.3. Пиковые ускорения соответствуют 0,35g.

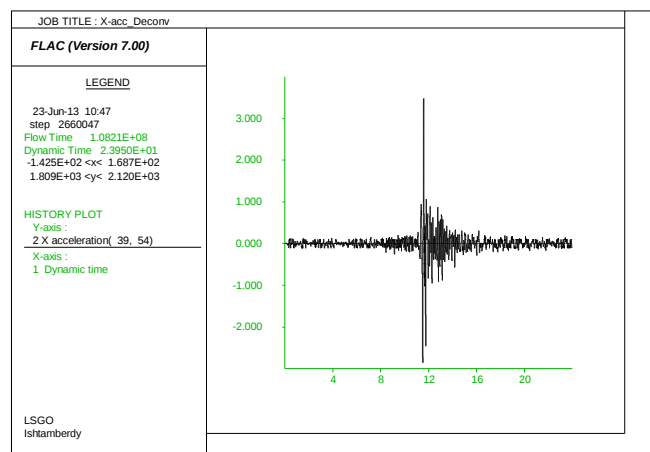


Рис. 3 - Запись горизонтальных ускорений на поверхности расчетной модели основания при приложении «Суусамырского» землетрясения.

Критерии сейсмостойкости являются основой для получения ответа относительно сейсмической устойчивости дамбы хвостохранилища от воздействия землетрясения. До недавнего времени сейсмическая устойчивость оценивалась на основании расчета коэффициента устойчивости для заданной поверхности сдвига. В настоящее время требования к оценке сейсмической устойчивости дамб повысились. Как уже отмечалось, расчеты на сейсмическое воздействие для гидротехнических сооружений II класса необходимо производить по прямому динамическому методу, то есть в рамках динамической теории сейсмостойкости. Оценка сейсмической устойчивости дамб на основе динамической теории сейсмостойкости производится по второму предельному состоянию, то есть по допустимым деформациям. Предельное состояние дамбы характеризуется наличием повреждений (осадок, смещений, трещин), способных привести к нарушению напорного фронта и, как следствие, - прорыву пульпы с образованием волны прорыва. В связи с этим, динамические критерии сейсмостойкости определяют предельно допустимые деформации с точки зрения сохранности напорного фронта. Нарушение напорного фронта связано либо с осадкой гребня дамбы, либо с потерей устойчивости и обрушением откосов с захватом гребня дамбы. Первый

динамический критерий связан осадкой гребня дамбы. Осадка h гребня дамбы при землетрясении не должна превышать запас между гребнем дамбы и уровнем воды верхнего бьефа, иначе произойдет перелив через гребень:

$$h < \nabla h = \nabla \Gamma_{p. \text{дамбы}} - \nabla УВП, \quad (3)$$

где $\nabla \Gamma_{p. \text{дамбы}}$ - отметка гребня дамбы; $\nabla УВП$ - отметка уровня воды в прудке хвостохранилища.

Наряду с критерием по осадке в качестве динамических критериев выбираются, деформационные характеристики, развивающиеся в теле дамбы. Выбор в качестве критерия какой-либо деформационной характеристики условен. Эти критерии основаны на сравнении допустимых деформаций с деформациями, развивающимися во время землетрясения. В качестве таких критериев могут быть:

1. Максимальная остаточная горизонтальная деформация в теле дамбы (расчетная область D меньше допустимой).
2. Средняя остаточная горизонтальная деформация по зоне D_1 области D , нормированной по площади Φ , меньше допустимой.
3. Максимальное значение второго инварианта тензора пластических деформаций меньше допустимого.
4. Средняя остаточная деформация по контуру дамбы меньше допустимой.

Все критерии сейсмостойкости сильно скоррелированы между собой, поэтому допустимо применить один из них. Предпочтительнее использовать два критерия: критерий сейсмостойкости V_3 и критерий h осадки гребня дамбы. Формирование поверхности скольжения связано с увеличением приращений пластических деформаций до величин порядка 2-5%. Необходимым условием обрушения откоса является условие, когда сформированная поверхность скольжения пересекает тело дамбы и имеет выход на поверхность откоса. Тем самым, формируется отсек обрушения. При этом, для нарушения напорного

фронта в результате обрушения откоса необходимо, чтобы поверхность скольжения, выходила на верховой откос ниже уровня воды в прудке. Так как дамба имеет конструкцию с возведением вдоль верхового откоса (хвосты являются основанием для дамб вторичного обвалования) в расчете необходимо уделить пристальное внимание возможному разжижению хвостов. Исследования Сида и др. [3] показали, что сейсмическая устойчивость грунтовых дамб достаточно хорошая, за исключением случаев, когда грунты с потенциально возможным разжижением формируют тело дамбы или являются их основанием.

До выполнения расчетов на сейсмическую устойчивость вначале необходимо выполнить фильтрационные расчеты в статическом состоянии дамбы. Фильтрационные расчеты являются обязательными и проводятся для определения положения кривой депрессии и распределения порового давления в водонасыщенных грунтах. Именно распределение порового давления при сейсмическом воздействии играет важную роль в оценке сейсмической устойчивости дамбы. В связи с этим, в расчетах на сейсмическую устойчивость необходимо учитывать реальный объемный модуль упругости воды, равный 2.03×10^9 Па.

На рис.4 представлена картина распределения порового давления и положение кривой депрессии.

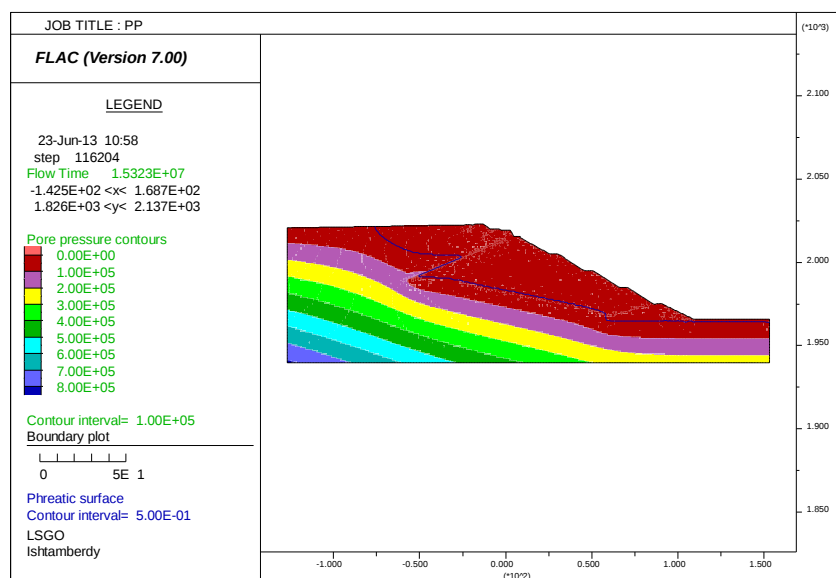


Рис. 4 - Распределение порового давления и положение кривой депрессии.

На рис.5 представлена картина распределения горизонтальных смещений от 23.95 секундного сейсмического воздействия землетрясения «Суусамыр». Наибольшие горизонтальные смещения сконцентрировались вдоль низового откоса. Величина смещений не превышает 4 сантиметра.

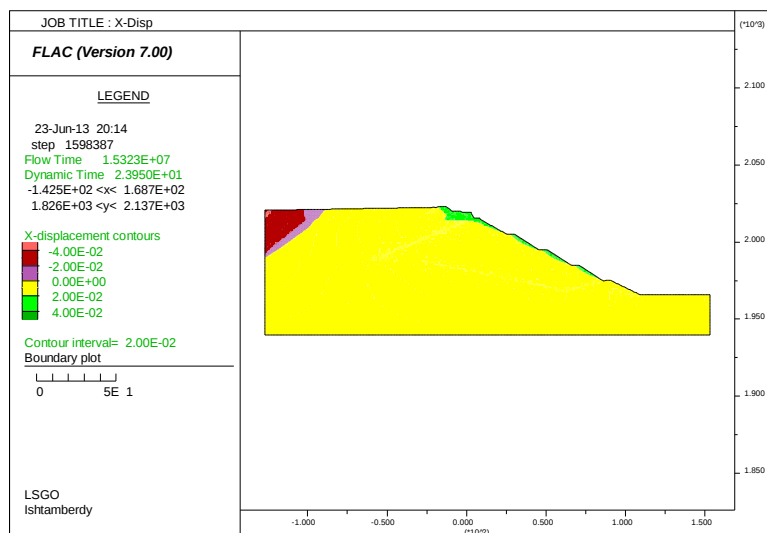


Рис. 5 - Распределение горизонтальных смещений на 23.95 секунде сейсмического воздействия.

На рис. 6 показаны графики горизонтальных и вертикальных смещений гребня дамбы обвалования второй очереди наращивания.

Максимальная величина горизонтальных смещений достигла 2.42 сантиметра, вертикальных - 2.06 сантиметра.

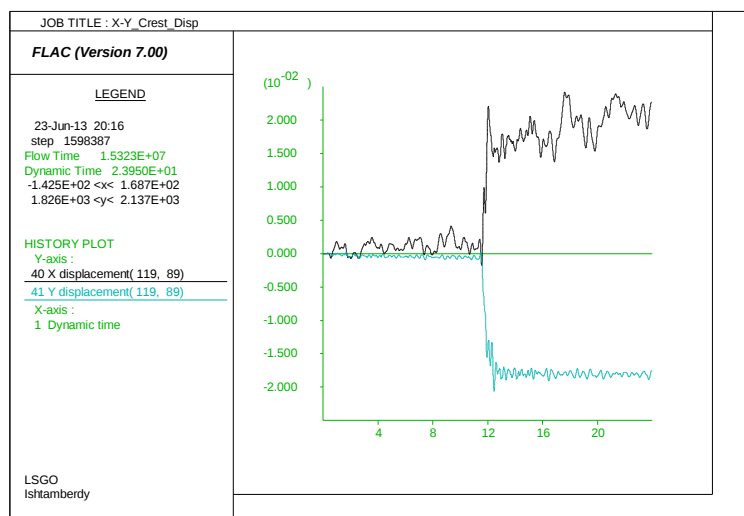


Рис. 6 - Графики горизонтальных и вертикальных смещений гребня дамбы.

В сейсмических расчетах очень важна величина максимальных деформаций сдвига, возникших во время сейсмической нагрузки. Для этого была использована специальная функция, запоминающая значения максимальных пластических деформаций сдвига. На рис.7 представлена картина распределения максимальных пластических деформаций сдвига. Максимальные пластические деформации сдвига составили 1.75% и сконцентрированы вдоль низового откоса. Дамба, согласно выбранным условиям сейсмостойкости, устойчива.

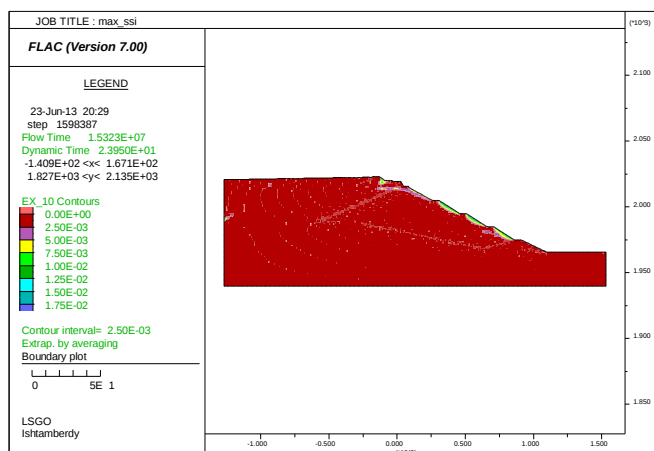


Рис. 7 - Расположения поверхностей скольжения в зависимости от максимальных пластических деформаций.

Для дамб с возведением вдоль верхового откоса очень важно при сейсмических расчетах определять области разжижения хвостов. Разжижение происходит в тех локациях, где отношение порового давления к эффективному сдерживающему напряжению превышает 0.9. Расчеты показали, что водонасыщенные хвосты от данного сейсмического воздействия разжижаются. Данный вид дамб очень чувствителен к положению кривой депрессии.

Согласно методике расчета, предложенной профессором Сиидом [3] в тех локациях, где отношение напряжений выше 0.9 после сейсмического расчета, значение угла внутреннего трения приравнивается 0 и производится статический расчет. В результате статического расчета выявляется положение поверхности сдвига после разжижения. На рис. 8 представлено положение поверхности сдвига после разжижения хвостов. Поверхность сдвига проходит через разжиженные хвосты и дамбы обвалования.

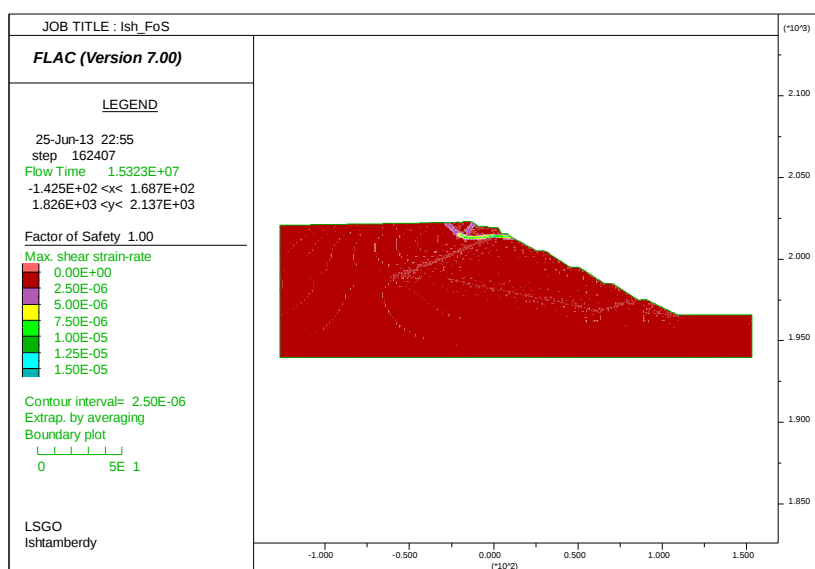


Рис. 8 - Контур максимальных касательных деформаций после разжижения хвостов.

Коэффициент устойчивости приближается к предельному значению, но дамба остается стабильной.

Максимальное значение горизонтальных смещений достигает 45 см. Максимальное значение вертикальных смещений составляет 25 см.

Расчеты на сейсмическую устойчивость показали важность мониторинга за положением уровня воды в прудке. Необходимо строго соблюдать, чтобы уровень воды в прудке не поднимался выше отметки, соответствующей ∇ Гр. дамбы – 1,5 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. МСН 3.04.-01-2005. Межгосударственные строительные нормы. Гидротехнические сооружения. Основные положения.
2. СНиП КР 20-02:2009. Сейсмостойкое строительство.
3. SPT-Based Analysis of Cyclic Pore Pressure Generation and Undrained Residual Strength (Анализ возникновения циклического порового давления на основе SPT и остаточная прочность недренированного грунта), 1993 г.