

Джаманбаев М.Д., Чукин Р.Б.

СЕЙСМИКАНЫН ТААСИРИ АЛДЫНДА КАЛДЫКТАРДЫН ЖИБҮҮСҮ

Джаманбаев М.Д., Чукин Р.Б.

РАЗЖИЖЕНИЕ ХВОСТОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

M.D. Dzhamanbaev, B.R. Chukin

TALINGS LIQUEFACTION UNDER SEISMIC LOADING

УДК: 627.5

Бул илимий макалада чоң плотиналар боюнча Эл аралык комитеттин (ICOLD) сейсмикасы активдүү болгон райондордо калдыктарды сактоочу жайлардын топурак тосмосун куруу ыкмалары келтирилген. Ар бир куруу ыкмасынын оң жана терс жактары төмөнкү көрсөткүчтөр боюнча толук берилген: сейсмикалык туруктуулук, калдыктарга коюлган талаптар, курулуштун баасына жана куруу мөөнөтүнө коюлган чектер. Азыркы учурда Кыргызстандагы долбоор мекемелери тосмолорду курууда жогорку жээкти улап тургузуу ыкмасына жол беришет. Мындай куруу ыкманын өзгөчөлүгү улап тургузулган тосмонун негизи болуп агып тушкөн калдыктар болот. ICOLD сунушу боюнча мындай калдыктар сейсмиканын таасири алдында жибий түшөт. Мындай сунушту изилдөө үчүн жогорку жээкти улап тургузуу ыкмасы менен курулган калдыктарды сактоочу жайдын топурак тосмосун сандык моделдөөнүн негизинде жүргүзүлгөн. Эсептөө үчүн топурактын керектүү болгон бардык касиеттери лабораториялык тесттердин жана инженердик-геологиялык изилдөөнүн негизинде алынган. Бирнанын математикалык моделинин сандык анализи жүргүзүлгөн. Бул модель сууга каныккан топуракка динамикалык жүктөөнүн негизиндеги жибүү процессин сурөттөйт. Агып тушкөн калдыктын жибүү эффектисин эске алуу менен калдыктардын үстүнө улап тургузулган тосмонун сейсмикалык туруктуулугу көрсөтүлгөн. Сандык моделдөөнүн негизинде жүргүзүлгөн изилдөөнүн жыйынтыктары чоң плотиналардын (тосмолордун) Эл аралык комитетинин сунуштары менен дал келет жана Кыргызстандагы сейсмикасы активдүү райондордо калдыктарды сактоочу жайлардын тосмолорун проектөөчү долбоор мекемелерине илимий негиз болот.

Негизги сөздөр: калдыктарды сактоочу жайлардын топурак тосмосу, калдыктар, куруу ыкмасы, сандык моделдөө, математикалык модель, динамикалык жүктөө, чөйрөнүн бош жерлериндеги басым, жибүү, улап тургузулган тосмолордун сейсмикалык туруктуулугу.

В данной статье приводятся рекомендации Международного комитета по большим плотинам (ICOLD) по выбору метода строительства грунтовых дамб хвостохранилищ в сейсмически активных районах. Приводятся положительные и отрицательные стороны каждого метода возведения по критериям: сейсмической устойчивости, требования к хвостам, ограничению по скорости возведения и стоимости строительства. В настоящее время в КР проектные организации отдают предпочтение так называемому методу возведения в сторону верхнего бьефа. Особенность этого метода заключается в том, что основанием дамб обвалования служат намывные хвосты, которые согласно рекомендациям ICOLD являются потенциально подверженными эффекту разжижения при сейсмическом воздействии. Для исследования выше сказанных рекомендаций выполнено численное моделирование реальной грунтовой дамбы хвостохранилища возведенной по методу

верхнего бьефа. Все свойства грунтов для выполнения расчетов были взяты по результатам инженерно-геологических изысканий и лабораторных тестов. Выполнен анализ математической модели Бирна, описывающей процесс разжижения водонасыщенных грунтов во время динамической нагрузки. Дана оценка сейсмической устойчивости дамб вторичного обвалования возводимых на намывных хвостах с учетом эффекта разжижения хвостов. Выполненные исследования на основании численного моделирования согласуются с рекомендациями Международного комитета по большим плотинам и являются научным обоснованием для проектных организаций занимающихся проектированием дамб хвостохранилищ в сейсмически активных районах КР.

Ключевые слова: грунтовая дамба хвостохранилища, хвосты, метод строительства, численное моделирование, математическая модель, динамическая нагрузка, поровое давление, разжижение, сейсмическая устойчивость дамб обвалования.

This paper provides recommendations of International Commission on Large Dams (ICOLD) of construction method selection of embankment tailings dams in seismic active areas. Positive and negative sides of each methods are described according criteria: seismic stability, tailings requirements, construction rates and costs. Now in KR project and design organizations gives preference to upstream construction method. The foundation of second turn embankment dams are tailings, which according to recommendations of the ICOLD can be potentially liquefied under seismic loading conditions. For research the recommendation above, numerical modelling of a real embankment tailings dam constructed by upstream method was performed. All properties for numerical modelling are results of engineering geological investigation and specimen lab testing. The analysis of mathematics Byrne model was made, which describes the physics of liquefaction process of saturated soils under dynamic loading. The assessment of seismic stability of second turn embankment dams constructed on tailings with effect of liquefaction is given. The completed research based on numerical modelling confirms the recommendations of the ICOLD and plays the role of scientific justification for project and design organizations making designs of embankment tailings dams in seismic areas of KR.

Key words: embankment tailings dam, tailings, construction method, numerical modelling, mathematical model, dynamic loading, pore pressure, liquefaction, seismic stability of second turn embankment dams.

В СНГ наиболее распространенной конструкцией наращивания дамб хвостохранилищ (ДХ) является метод верхнего бьефа, заключающийся в том, что основанием для каждой последующей дамбы наращивания выступают хвосты. Данная конструкция хорошо зарекомендовала себя в районах с низким уровнем сейсмичности и как показала международная практика, совершенно не приемлема для районов с

высокой сейсмичностью. Проанализировав аварии ДХ произошедших в мире Международный комитет по большим плотинам и дамбам (ICOLD) выпустил бюллетень «Tailings Dams and Seismicity – Review and Recommendations» [1], в котором отражены рекомендации по выбору метода строительства ДХ в зависимости от нескольких показателей. Данные рекомендации в сокращенном виде приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Рекомендации по выбору метода строительства ДХ

Метод строительства	Требования к хвостам	Сейсмостойчивость	Ограничения по возведению	Стоимость дамбы
В верхний бьеф	Не менее 60% песков в общем объеме хвостов	Плохая	4,6 -9,1 м/год.	Низкая
В нижний бьеф	Подходит для любого типа хвостов	Хорошая	Нет	Высокая
Серединной линии	Пески или шламы с низкой подвижностью	Приемлемая	Могут быть ограничения по высоте	Умеренная

Согласно карте сейсмического районирования территория КР фактически вся охвачена исходной сейсмичностью от 8 до 9 баллов. С учетом позиции сейсмостойчивость ДХ в таблице 1, проектирование ДХ на территории КР необходимо выполнять по методу нижнего бьефа или серединной линии. Для подтверждения данных рекомендаций нами были выполнены исследования для реального объекта - ДХ комплекса Иштамберды на котором дамбы обвалования запроектированы по методу верхнего бьефа. При сейсмическом воздействии водонасыщенные хвосты могут разжижаться, теряя свою несущую способность. В результате разжижения хвостов может произойти обрушение дамб наращивания и как следствие развитие гидродинамической аварии. Расчеты проводились в плоской постановке вдоль типового сечения, где дамба имеет максимальную высоту показанная на рисунке 1.

Высота упорной призмы составляет 7,3 метра; высота пионерной дамбы от гребня к основанию составляет - 35,0 метров; высота первого яруса дамбы вторичного обвалования - 5,7 метров; высота второго яруса - 3,8 метра; общая высота сооружения равна - 43,1 метр. Заложение верхового откоса пионерной дамбы $m=1:2,25$; низового откоса $m=1:1,9$. Заложение вторичных дамб обвалования симметрично $m=1:1,5$. Расчетные свойства материалов представлены в таблице 2.

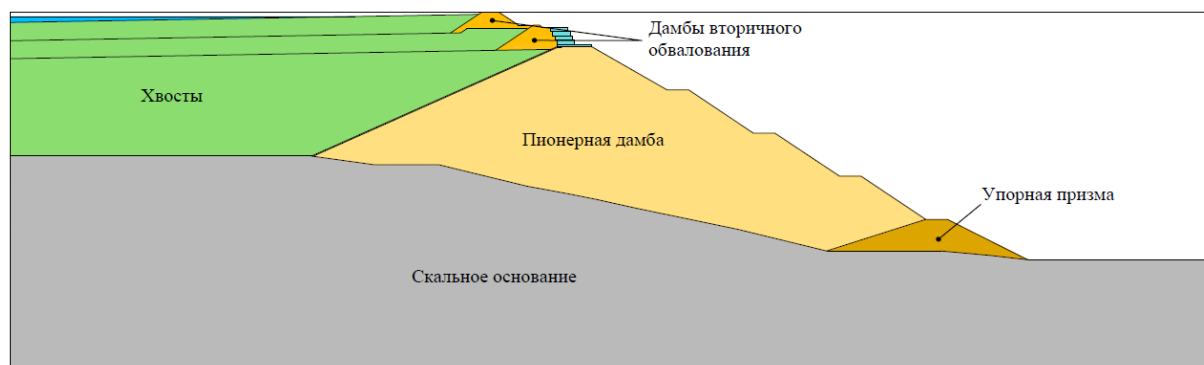


Рис. 1. Расчетное сечение ДХ.

Таблица 2

Расчетные свойства грунтов

	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости объемных деформаций, Па	Модуль упругости сдвига, Па	Сцепление, Па	Угол внутреннего трения, градус
Основание	2700	2,26*10 ¹⁰	1,1*10 ¹⁰	6,72*10 ⁶	42
Упорная призма	2000	1*10 ⁷	6*10 ⁶	3*10 ³	38
Тело дамб	2100	2,67*10 ⁷	1,6*10 ⁷	1000	35
Пульпа	1887	1,13*10 ⁸	4,25*10 ⁷	2400	14

Согласно действующего СНиП КР 20-02:2009 [2], расчеты на сейсмическое воздействие для гидротехнических сооружений II класса необходимо производить по прямому динамическому методу. Все расчеты выполнялись в лицензионной программе FLAC. В качестве динамической нагрузки была выбрана акселерограмма афтершока «Суусамырского» землетрясения (Кыргызская Республика, Суусамыр, 7 сентября 1992 года). Район строительства дамбы Иштамберды, согласно утвержденной «Карте сейсмического

районирования Кыргызской Республики», отнесен к 9 балльной зоне интенсивности. Возможное пиковое ускорение для таких зон составляет порядка 0.4g. Запись акселерограммы прошла подготовительные расчеты масштабирования, фильтрации от незначительных частот и корректировку. Готовая запись акселерограммы к расчетам продолжительностью 24 секунды и пиковым горизонтальным ускорением 0,35g показана на рисунке 2. По вертикальной оси – ускорения в м/с², по горизонтальной оси – время в секундах.

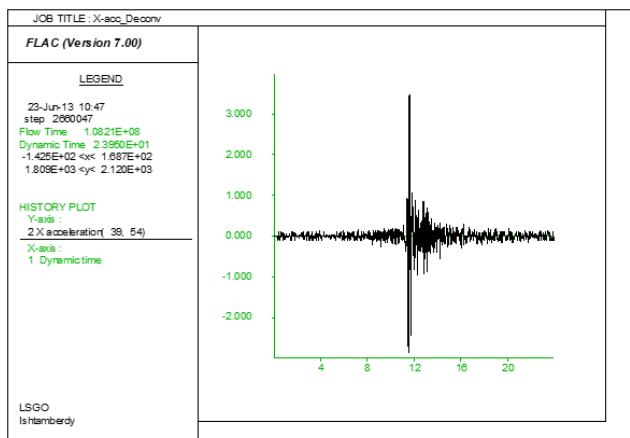


Рис. 2. Запись горизонтальных ускорений на поверхности расчетной модели.

До выполнения расчетов на сейсмическую устойчивость были выполнены фильтрационные расчеты в статическом состоянии дамбы. Фильтрационные расчеты проводятся для определения величин порового давления от положения кривой депрессии в водонасыщенных грунтах. В данных расчетах уровень воды в чаше хвостохранилища был поднят намерено на 1 метр от фактического. Фильтрационные свойства материалов представлены в таблице 3. Положение кривой депрессии и распределение величин порового давления показано на рисунке 3.

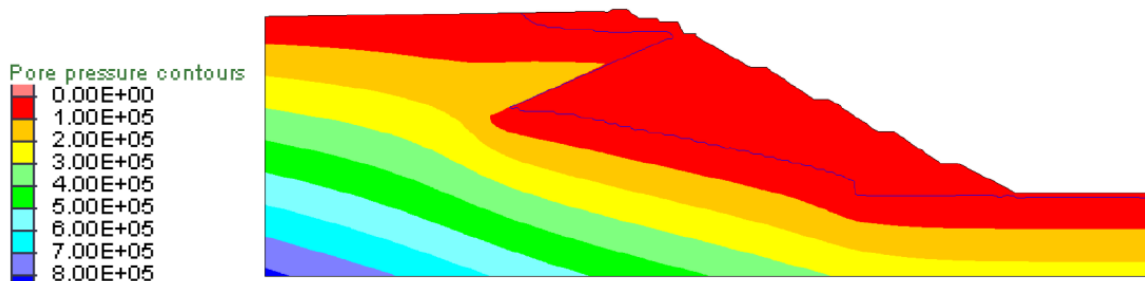


Рис. 3. Кривая депрессии и распределение порового давления.

Разжижение – это потеря прочности водонасыщенного грунта на сдвиг под воздействием монотонной или циклической нагрузки, возникающей из-за стремления рыхлого грунта уменьшиться в объеме, что приводит к росту порового давления и уменьшению эффективных напряжений.

Таблица 3

Фильтрационные свойства материалов

	Грунты тела дамбы	Скальное основание	Упорная призма	Хвосты
Гидравлическая проницаемость, м ² /Па*сек	6,5*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	1*10 ⁻⁷	1*10 ⁻⁹
Пористость	0,3	0,3	0,3	0,3

Встроенные численные модели в программе FLAC не моделируют непосредственно сам процесс разжижения [3]. Однако, при моделировании поровое давление реагирует на изменение объема пор в грунте вызванное динамической нагрузкой, учитывая физику всего процесса. Возрастание порового давления – это вторичная реакция водонасыщенного грунта на динамическую нагрузку, первичная реакция – это невосстанавливаемое изменение в объеме матрицы частиц грунта, когда материал испытывает полный цикл сдвиговой нагрузки под действием постоянного сжимающего напряжения. Данный механизм был описан Мартином (1975) [4], который вывел эмпирическое выражение связывающее изменение в уменьшении объема за цикл сдвиговой деформации, $\Delta\epsilon_{vd}$, к амплитуде циклической сдвиговой деформации, γ :

$$\Delta\epsilon_{vd} = C_1^c(\gamma - C_2^c\epsilon_{vd}) + \frac{C_3^c\epsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4^c\epsilon_{vd}} \quad (1)$$

где C_1^c , C_2^c , C_3^c и C_4^c являются константами, ϵ_{vd} – аккумулирующая невосстанавливаемая объемная деформация.

Альтернативное и выражение было разработано Бирном (1991) [5]:

$$\frac{\Delta\epsilon_{vd}}{\gamma} = C_1^c \exp(-C_2^c \left(\frac{\epsilon_{vd}}{\gamma}\right)) \quad (2)$$

где C_1^c и C_2^c константы, но выражаемые иначе чем в уравнении Мартина.

Бирн определяет константу C_1^c в взаимосвязи от относительной плотности D_r :

$$C_1^c = 7600(D_r)^{-2.5} \quad (3)$$

Затем, используя эмпирическое выражение, связывающее D_r и значение нормализованного теста на пенетрацию $(N_1)_{60}$:

$$D_r = 15(N_1)_{60}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

тогда,

$$C_1^c = 8,7(N_1)_{60}^{-1.25} \quad (5)$$

$$C_2^c = \frac{0.4}{C_1^c} \quad (6)$$

Таким образом, объемные деформации больше для меньших значение стандартного теста пенетрации. Изменения объемных деформаций грунта, Бирн определяет из выражения:

$$\Delta\sigma_m + \alpha\Delta p = K\Delta\epsilon_{vd} \quad (7)$$

где, $\sigma_m = \sigma_{ii}/3$, среднее нормальное напряжение; p – поровое давление, α – коэффициент Байота равный 1 для грунта; K – модуль упругости объемных деформаций грунта.

Полученное выражение (7) определяет уменьшение значения эффективных напряжений в грунте от циклических деформаций сдвига. Как видно из выражения (7), модуль упругости объемных деформаций грунта K играет важную роль в определении магнитуды влияния циклической нагрузки на снижения эффективных напряжений в материале. Данные выражения реализованы в программе FLAC в виде численной модели материала, называемой «*Finn-Byrn model*», описывающей основную физику процесса разжижения. Для этой модели на ряду с физико-механическими свойствами грунта необходимо указать значение нормализованного теста на пенетрацию, в данной задаче рыхлым хвостам значение ударов теста на пенетрацию приравняется $(N_1)_{60}=10$. Область разжижения в численной модели определяется из выражения:

$$u_e/\sigma'_c \geq 0,9 \quad (8)$$

где, u_e – избыточное поровое давление (изменение порового давления от циклической нагрузки); σ'_c – первоначальное эффективное сжимающее напряжение.

На рисунке 4 представлены контуры u_e/σ'_c (разжижения грунта при значении больше 0,9) после сейсмического воздействия. Как видно из рисунка хвосты под дамбами вторичного обвалования разжижаются.

На финальном этапе расчета в областях где хвосты разжижаются с значением $u_e/\sigma'_c \geq 0,9$ прочностные свойства, сцепление и угол внутреннего трения приравниваются нулю и выполняется расчет на статическую устойчивость [6]. В результате анализа поверхность скольжения с предельны коэффициентом устойчивости $K_u=1,0$ показана на рисунке 5. Поверхность скольжения проходит вдоль разжиженных хвостов в основании дамб обвалования с выходом на низовой откос, образуя замкнутый отсек обрушения.

Выполненные исследования подтверждают рекомендации Международного комитета по большим плотинам об опасности запроектированных ДХ по методу верхнего бьефа в сейсмически активных районах по причине разжижения хвостов. В данном исследовании была использована запись землетрясения продолжительностью 24 секунды. При более длительном землетрясении область разжижения может увеличиться.

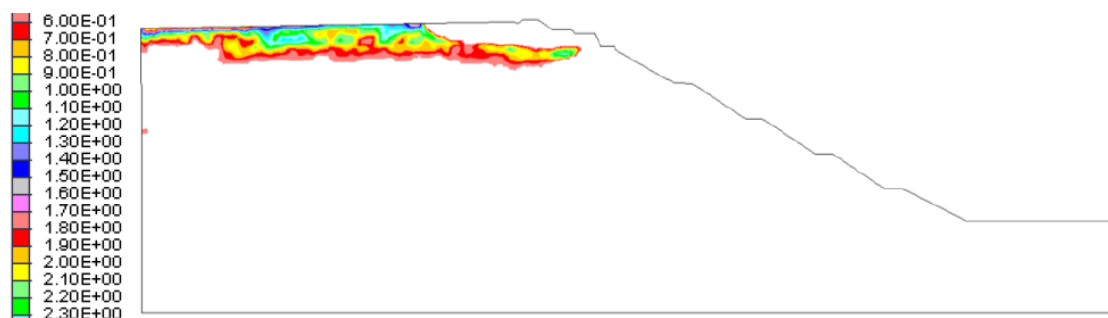


Рис. 4. Распределение отношения избыточного порового давления к эффективным напряжениям.

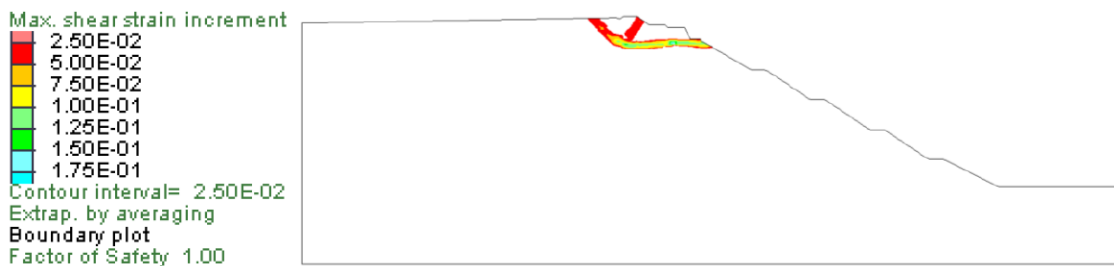


Рис. 5. Распределение деформация сдвига после разжижения хвостов ($K_u = 1,0$).

Литература:

1. International Commission on Large Dams, «Tailings dams and seismicity – Review and recommendations». Bulletin 98. - Paris, 1995.
2. СНиП КР 20-02:2009, «Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования». - Госстрой КР, 2009.
3. FLAC, «User manual. Dynamic Analysis», Itasca Consulting Group Inc. Minnesota, USA, 2011.
4. Martin G.R., W.D.L. Finn and H.B. Seed, «Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading», Geotechnical Journal №101, 1975.
5. Byrne P.M., «A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand», Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1991.
6. Seed H.B. and I. Idriss, «Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential», Soil Mechanics & Foundations Journal №97, 1971.

Рецензент: к.т.н. Ким Э.А.