

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ
В РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ
ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ УКРАИНЫ**

Оглобля А.И., д.т.н., профессор,
Раздайбеда С.Л.,
ГИ «УкрНИИводоканалпроект», г. Киев
main@uvkr.com.ua

Довбнич М.М., д.г.н.,
ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр
dovbnichm@mail.ru

Аннотация. Обсуждается комплекс работ по сейсмическому микрорайонированию хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов Украины. Рассматриваются современные подходы оценки сейсмичности с учетом изменения свойств среды, связанного со строительством и эксплуатацией хвостохранилищ. Обсуждается привлечение для целей сейсмического микрорайонирования современных возможностей вычислительной техники и математического моделирования, создание цифровых моделей объекта исследования. Рассматривается применение расчетных акселерограмм и других динамических характеристик грунтов, полученных в результате сейсмического микрорайонирования, в расчетах при проектировании хвостохранилищ. Показаны примеры расчета на устойчивость ограждающих дамб в программном комплексе «Geo Studio» (Канада).

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, акселерограмма, динамические характеристики грунта, разжижение грунта, расчет устойчивости, поровое давление.

**ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СЕЙСМІЧНОГО МІКРОРАЙОНУВАННЯ В
РОЗРАХУНКАХ СТІЙКОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ СПОРУД ХВОСТОСХОВИЩ
ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ УКРАЇНИ**

Оглобля О.І., д.т.н., професор,
Раздайбіда С.Л.
ДІ «УкрНДІводоканалпроект», м. Київ
main@uvkr.com.ua

Довбніч М. М., д.г.н.,
ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро
dovbnichm@mail.ru

Анотація. Обговорюється комплекс робіт по сейсмічному микрорайонуванню хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів України. Розглядаються сучасні підходи оцінки сейсмічності з урахуванням зміни властивостей середовища, пов'язаного з будівництвом і експлуатацією хвостосховищ. Обговорюється залучення для цілей сейсмічного микрорайонування сучасних можливостей обчислювальної техніки і математичного моделювання, створення цифрових моделей об'єкта дослідження. Розглядається застосування розрахункових акселерограм та інших динамічних характеристик ґрунтів, отриманих в результаті сейсмічного микрорайонування, в розрахунках при проектуванні хвостосховищ. Показано приклади розрахунку на стійкість огороджувальних дамб у програмному комплексі «Geo Studio» (Канада).

Ключові слова: сейсмічне мікрорайонування, акселерограма, динамічні характеристики ґрунту, розрідження ґрунту, розрахунок стійкості, поровий тиск.

USAGE OF THE SEISMIC ZONING RESULTS IN THE TAILINGS DAMS STABILITY ANALYSIS OF THE ORE-DRESSING AND PROCESSING ENTERPRISES OF UKRAINE

Ohloblia O.I., Doctor of Engineering, Professor,
Razdaybida S.L.,
SI «UkrRDIwaterchannelproject», Kyiv
main@uvkp.com.ua

Dovbnich M.M., doctor of Geology,
“National mining university”, Dnipro
dovbnichm@mail.ru

Abstract. The complex of works on seismic zoning of tailing dams of Ukraine ore-dressing enterprises is discussed. The modern approaches and experience seismic assessment, taking into account changes in the properties of the environment associated with the construction and operation of the tailings are considered. Modern possibilities of computer technology and mathematical modeling, creation of digital models of the research object and involvement them for the purposes of seismic zoning are discussed. Usage of the calculated accelerograms and other dynamic characteristics of soils that were derived from seismic zoning in calculations of tailings facilities is considered. The method of forecasting of possible seismic liquefaction anthropogenic soils based on the analysis of shear wave velocities (VS) at the seismic data is considered. The source data for such studies are the results of seismic hazard assessment in the studied area and velocity models of environment. Examples of the tailing dams stability that were calculated in the software package «Geo Studio» (Canada) are shown.

Keywords: seismic micro zoning, accelerograms, dynamic characteristics of the soil, liquefaction, the calculation of the stability, pore pressure.

Введение. Проектирование и реконструкция объектов хвостовых хозяйств горно-обогатительных комбинатов Украины является основным направлением деятельности ГИ «УкрНИИводоканалпроект». Среди запроектированных объектов – хвостовые хозяйства горно-обогатительных комбинатов Украины, таких как Полтавский, Еристовский, Северный, Ингулецкий, Центральный, Южный, АрселорМиттал Кривой Рог, Восточный, Николаевский глиноземный завод, а также другие предприятия Украины и стран СНГ.

Основным сооружением хвостового хозяйства является хвостохранилище – емкость для складирования отходов (хвостов) горно-обогатительных производств, которые транспортируются гидравлическим способом от обогатительных фабрик. Емкость хвостохранилища по контуру ограничивается ограждающими сооружениями, состоящими из первичных дамб обвалования из суглинистого ґрунта, дамб наращивания и разделительных дамб из каменной наброски или хвостов. Эти дамбы образуют систему карт, замываемых хвостами. Поверхность замытых карт после отстаивания используется как основание для устройства карт следующего яруса.

Хвостохранилища горно-обогатительных комбинатов относятся к классу особо ответственных гидротехнических сооружений, разрушение которых может повлечь тяжелые экологические и социально-экономические последствия. Одним из факторов, оказывающих влияние на безопасность функционирования подобных объектов, являются сейсмические воздействия, вызванные землетрясениями тектонической и техногенно-индуцированной природы.

Согласно ДБН В.1.1-12:2014 [1] сейсмические воздействия учитываются в тех случаях, когда величина составляет 6 баллов и более. Таким образом, объекты института,

находящиеся в областях Украины, которые отнесены к 6 или 7-балльной зоне и с учетом класса последствий (ответственности) ССЗ и СС2-1, должны рассчитываться прямым динамическим методом (ПДМ) с представлением сейсмического воздействия в виде набора акселерограмм. Кроме того, при наличии в основании или теле гидротехнического сооружения водонасыщенных несвязных или слабосвязных грунтов, следует выполнять исследования для оценки области и степени возможного разжижения этих грунтов при сейсмических нагрузках.

Цель исследований. Рассмотрение современных подходов и опыта оценки сейсмичности с учетом изменения свойств среды, связанного со строительством и эксплуатацией хвостохранилища, и последующего анализа влияния сейсмичности на устойчивость ограждающих сооружений.

Методы и результаты исследований. В практике инженерной сейсмологии сейсмическая опасность (расчетная сейсмичность) территории промышленных объектов определяется двумя характеристиками: фоновой или нормативной сейсмичностью I_n и приращением сейсмичности за счет влияния локальных грунтовых условий ΔI , выражаемых в сейсмических баллах и/или коэффициенте усиления сейсмических колебаний. Величина I_n относится к «средним» условиям (в отечественных нормативах к грунтам II категории по сейсмическим свойствам). Расчетная сейсмичность территории равна сумме $I_p = I_n + \Delta I$.

Согласно ДБН В.1.1-12:14 [1] при проектировании гидротехнических сооружений расчеты на сейсмическое воздействие выполняются для двух уровней: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ).

ПЗ должно восприниматься гидротехническим сооружением без нарушения режима его нормальной эксплуатации. При этом допускаются остаточные смещения, трещины и иные повреждения, не препятствующие возможности ремонта сооружения в условиях его нормального функционирования.

МРЗ должно восприниматься без угрозы разрушения гидротехнического сооружения или прорыва напорного фронта. При этом допускаются повреждения сооружения и его основания.

В соответствии с требованиями ДБН В.1.1-12:14 [1] при расчете сейсмической устойчивости гидротехнических сооружений значения нормативной балльности для периода повторяемости $T=500$ лет принимается в качестве проектного землетрясения (ПЗ), для периода повторяемости $T=5000$ лет в качестве максимального расчетного землетрясения (МРЗ). При этом нормативная сейсмичность определяется по картам ОСР-2004-А и ОСР-2004-С для уровня ПЗ и МРЗ соответственно.

Сейсмическое микрорайонирование площадок расположения хвостохранилищ выполняется с целью получения уточненных данных о сейсмичности территории исследований с учетом локальных геологических условий, оценки пиковых ускорений поверхности грунта, изучения резонансных свойств грунтовой толщи, расчета синтетических акселерограмм на поверхности грунта. Данные исследования являются неотъемлемой частью дальнейших расчетов на сейсмостойкость проектируемых ограждающих дамб при наращивании хвостохранилища.

В условиях низкого сейсмического режима территорий расположения хвостохранилищ авторами используется комплекс методов сейсмического микрорайонирования, получивших широкое применение в отечественной и зарубежной практике:

- метод инженерно-геологических аналогий;
- метод сейсмических жесткостей;
- метод V_s^{30} ;
- расчетный метод.

Данные, полученные методом инженерно-геологических аналогий, носят оценочный характер и учитываются на этапе проектирования инструментальных и расчетных методов для оценки приращения сейсмической интенсивности.

Привлечение для целей сейсмического микрорайонирования современных

возможностей вычислительной техники и достижений математического моделирования предполагает создание цифровых моделей объекта исследования.

В случае инженерно-сейсмологических исследований, необходимо иметь физико-геологическую модель, которая представляет собой структурный каркас, «наполненный» физическими свойствами (в первую очередь значениями скоростей распространения сейсмических волн и плотности). Структурная модель строится на основании всей имеющейся априорной геологоразведочной и инженерно-геологической информации и должна включать в себя информацию о гипсометрии всех основных геологических элементов разреза, способных оказывать влияние на трансформацию исходного сейсмического воздействия и обуславливать приращение сейсмической интенсивности. Скоростные и плотностные свойства среды определяются в ходе проведения геофизических и инженерно-геологических исследований.

Информация о скоростной модели среды является важнейшим звеном как при оценке приращений сейсмической интенсивности инструментальными методами (методом сейсмических жесткостей, V_s^{30}), так и при формировании моделей территории исследований при применении расчетных методов.

Значения скорости распространения поперечных S-волн в верхней толще разреза – основной параметр, определяющий класс грунта в отношении сейсмических воздействий, как в отечественных, так и зарубежных нормативных документах [1-3].

Данные о скоростях поперечных волн получают путем проведения полевых сейморазведочных работ корреляционным методом преломленных волн (КМПВ) или скважинных сейморазведочных работ методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

Для целей сейсмического микрорайонирования по результатам сейморазведочных работ выполняется статистический анализ распределения скоростей в техногенных грунтах и грунтах естественного основания, а затем, с привлечением цифровой модели среды выполняются расчеты средних скоростей поперечных волн в грунтовой толще мощностью 30 и 40 м. Выбор указанных мощностей грунтовой толщи сделан не случайно. Так, согласно требованиям ДБН В.1.1-12:14 [1] при сейсмическом микрорайонировании площадок размещения гидротехнических сооружений, к которым относятся ограждающие дамбы хвостохранилищ, изучению подвергается верхняя 40 метровая толща. Изучение 30 метрового слоя регламентировано ведущими зарубежными нормативами [2, 3].

Исследования по методу сейсмических жесткостей выполняются для определения величины приращения сейсмической интенсивности, обусловленной конкретными грунтовыми условиями. Применение метода сейсмических жесткостей основано на эмпирической зависимости между сейсмическими жесткостями грунтов (произведение скорости упругих волн на плотность грунтов) и приращениями сейсмической интенсивности [4].

В методе V_s^{30} прогнозирование усиления вероятных сейсмических движений осуществляется на основании анализа скоростей поперечных волн (V_s^{30}) верхней 30-метровой части разреза [3]. Коэффициенты усиления могут быть легко пересчитаны в приращения сейсмической интенсивности.

Внедрение в последние десятилетия в практику исследований мощной вычислительной техники позволяет рассматривать применение расчетных методов как эффективный инструмент оценки влияния локальных инженерно-геологических особенностей на приращение сейсмической интенсивности.

Для расчетов используются одномерные (горизонтально слоистые) модели среды, что вполне допустимо в условиях близко горизонтального залегания основных геологических элементов осадочной толщи.

Геометрические, скоростные и плотностные параметры моделей оцениваются на основе цифровой физико-геологической модели территории исследования.

Для учета особенностей нелинейного неупругого поведения грунтов используются эквивалентные линейные модели. Эквивалентная линейная модель основана на

предположении, что модуль сдвига и коэффициент затухания являются функциями деформации сдвига. Зависимости модуля сдвига и коэффициента затухания от деформации сдвига для каждого инженерно-геологического элемента, слагающего разрез, выбираются на основании моделей, полученных для различных пород [5].

Для расчетов используются синтезированные акселерограммы, сгенерированные методом, использующим стандартные спектры ответа. Считается, что полученные таким образом синтетические акселерограммы заменяют весь ансамбль использованных для обобщения акселерограмм.

Оценка влияния толщи осадочных пород на трансформирование сейсмического сигнала осуществляется пересчетом акселерограммы со «скалы» (кристаллического фундамента) на дневную поверхность. Расчеты выполняются с использованием программы SHAKE [6]. В основу работы программы положен метод решения Канаи волнового уравнения и алгоритмы быстрого Фурье-преобразования.

В ходе вычислений определяется передаточная функция среды (частотная характеристика среды), акселерограммы на дневной поверхности, усиление амплитуды колебаний по отношению к «скале», приращение сейсмической интенсивности.

Акселерограммы полученные на дневной поверхности и пронормированные на величины пиковых ускорений, оцененные с учетом результатов сейсмического микрорайонирования, используются для расчетов устойчивости ограждающих дамб хвостохранилищ прямым динамическим методом. В ходе пересчета для таких акселерограмм учтены резонансные эффекты для конкретной физико-геологической ситуации.

Для оценки влияния техногенного рельефа на приращение сейсмической интенсивности привлекается полноволновое двухмерное моделирование.

В условиях наличия толщи намывных грунтов актуальным является вопрос оценки их разжижения при сейсмических воздействиях. При наличии потенциальных рисков разжижения, включая риски, связанные с сейсмической активностью, следует учесть максимальную магнитуду землетрясения, а пиковые ускорения принимать для двух уровней: проектное землетрясение (ПЗ); максимальное расчетное землетрясение (МРЗ).

Недоучет этого фактора может привести к тому, что результат сейсмического разжижения грунтов обычно сопровождается тяжелыми авариями даже сейсмостойких сооружений.

В настоящее время разработана многообещающая альтернатива либо дополнение к существующим подходам – методика прогнозирования возможности сейсмического разжижения грунтов на основе скоростей поперечных волн (V_s) по данным сейморазведки [7]. Исходными данными для подобного рода исследований являются результаты оценки сейсмической опасности территории исследований и скоростные модели среды.

Для соответствия проектов, разрабатываемых ГИ «УкрНИИводоканалпроект», требованиям действующих норм, потребовались новые программные средства. Учитывая, что в Украине такие программы отсутствуют, в 2011 г. был приобретен программный комплекс (ПК) «GEO STUDIO» (Канада), с помощью которого, стало возможным выполнять необходимые расчеты устойчивости и прочности ограждающих сооружений.

Для определения влияния сейсмичности на устойчивость ограждающих сооружений, как правило, используются 3 программных модуля: SEEP/W [8] – фильтрационный расчет, SLOPE/W [9] – расчет устойчивости откосов, QUAKE/W [10] – расчет напряженного состояния при динамических воздействиях. Причем порядок расчетов следующий: первым выполняется фильтрационный расчет (SEEP/W [8]) в результате которого, определяются положение кривой депрессии, величины гидравлического напора и порового давления в узлах конечно-элементной сетки. Эти параметры в автоматическом режиме передаются в модуль расчета напряженно-деформированного состояния от сейсмического воздействия QUAKE/W [10] и затем в модуль SLOPE/W для определения коэффициента запаса устойчивости с учетом сейсмичности. Текущая версия 8.11 ПК позволяет выполнять все виды расчетов в одном файле, устанавливая последовательность расчетов в виде иерархической структуры, при этом выходные данные главного расчета становятся входными данными для подчиненного.

В «GEO STUDIO» динамические характеристики грунтов могут задаваться как функциями так и константами, а некоторые только функциями. Все функции задаются рядами парных значений (в табличной форме).

Функция G-редукции (функция снижения модуля сдвига) отражает тенденцию грунта к «размягчению» под воздействием циклических напряжений. В эквивалентно-линейной модели грунта это свойство описывается отношением G/G_{max} .

Коэффициент демпфирования характеризует затухание интенсивности сейсмической волны.

В результате расчетов напряженно-деформированного состояния (модуль QUAKE/W [9]) тела дамбы и ее основания при сейсмическом воздействии, заданном расчетными акселерограммами получаем:

- полные и эффективные напряжения (X, Y, XY)*;
- касательные напряжения (максимальные, девиаторные, пиковые динамические);
- относительные и полные перемещения, деформации (X, Y, XY);
- полное и избыточное поровое давление.

* X, Y, XY – значения в горизонтальном, вертикальном направлении и максимальное значение (по модулю).

Все результаты могут отображаться в виде изополей и изолиний, а также можно получить значение искомого параметра в любом узле конечно-элементной сетки. Кроме того, перемещения могут отображаться в виде деформированной сетки в заданном масштабе увеличения. Ниже на примере хвостохранилища «Войково» (ПАО ЮГОК) показаны некоторые возможности ПК «GEO STUDIO» по выводу результатов расчета (рис. 1, 2).

Выводы: влияние сейсмике на устойчивость ограждающих сооружений. В результате циклических колебаний происходит уплотнение хвостов с передачей части давления на поровую воду. Поровое давление увеличивается на величину избыточного порового давления (величину превышения порового давления над гидростатическим). Из формулы Мора-Кулона (1) видно, что прочность (сопротивление сдвигу) грунта напрямую зависит от величины эффективных напряжений:

$$\tau = \sigma' \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1)$$

где: $\sigma' = \sigma - u$ – эффективные вертикальные напряжения; σ – полные вертикальные напряжения; u – поровое давление; φ – угол внутреннего трения; c – удельное сцепление.

Из приведенной формулы также видно, что при равенстве величин порового давления и полного напряжения, величина эффективных напряжений становится равной нулю, а прочность – равной удельному сцеплению (или нулю в случае несвязного грунта). Это состояние именуется сейсмическим разжижением грунта.

Анализ напряженно-деформированного состояния грунтов основания, первичной дамбы и намывных хвостов при динамических нагрузках и последующие расчеты устойчивости показывают, что снижение устойчивости и прочности в результате сейсмических колебаний имеют место по всем расчетным створам (хвостохранилище «Войково», ПАО ЮГОК). Уменьшение эффективных нормальных напряжений в результате возникновения избыточного порового давления и, вследствие этого, снижение прочности, наблюдается в локальных зонах массивов хвостов на глубине 10...40 м. Однако, ввиду ограниченности этих зон, как показывают результаты расчетов, нормативная общая устойчивость обеспечивается.

В заключение хотелось бы отметить, что для повышения устойчивости хвостов при сейсмическом воздействии применимы те же мероприятия, что и при статических нагрузках – это снижение уровня кривой депрессии и пригрузка грунтом. Эти мероприятия даже более эффективны, чем при статике, так как отсутствие влаги и увеличение статических напряжений уменьшают способность грунтов к разжижению.

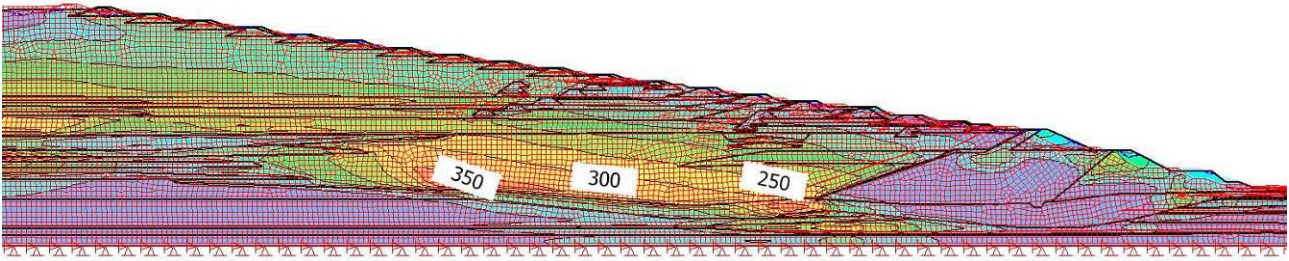


Рис. 1. Перемещения показаны в виде деформированной сетки. Избыточное поровое давление – в виде изолиний

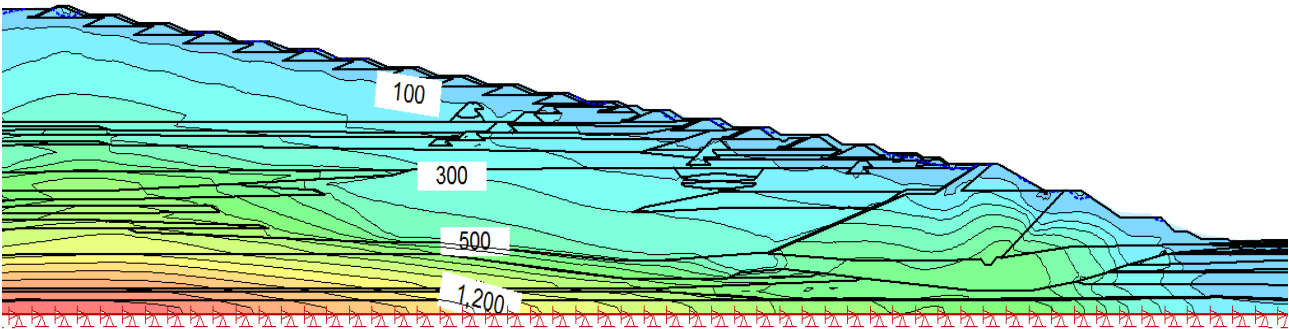


Рис. 2. Изолинии вертикальных эффективных напряжений

Литература

1. ДБН В.1.1-12: 2014 Будівництво в сейсмічних районах України. – Київ: Мінбуд України, 2014. – 110 с.
2. Eurocode 8 Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004. – 229 p.
3. BUILDING SEISMIC SAFETY COUNCIL (BSSC): NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, 2003 Edition, Part 1: Provisions (FEMA 450), Washington, D.C., 2004. – 338 p.
4. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. – Москва: Светоч Плюс, 2010. – 303 с.
5. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K.. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, Vol. 112, No. 11 – P.1016–1032.
6. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B. “SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites”, Report No. EERC72-12, Berkeley, California, 1972. – 102 p.
7. Andrus, R.D., and Stokoe, K.H., “Liquefaction resistance based on shear wave velocity” Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Tech. Rep. NCEER-97-0022, T.L. Youd and I. M. Idriss, eds., National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, 1997, P.89–128.
8. Seepage Modeling with SEEP/W. GEO-SLOPE International Ltd, 2012. – С. 25-104.
9. Stability Modeling with SLOPE/W. GEO-SLOPE International Ltd, 2012. – С. 27-103.
10. Dynamic Modeling with QUAKE/W. GEO-SLOPE International Ltd, 2012. – С. 29-104.

Стаття надійшла 4.09.2016