

УДК 627.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОСТРУКТУРЫ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВЗРЫВО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ КАМБАРАТИНСКОЙ ГЭС-2

И.А. Торгоев, Х.Б. Хавенит, Ю. Ху, А.Д. Торгоев

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР,
Льежский университет (Бельгия),
Университет Аахена (Германия)

Введение. Одним из ключевых этапов строительства Камбаратинской ГЭС-2 (КГЭС-2) стало возведение плотины, которая перекрыла русло р. Нарын и направила потоки воды через гидроагрегаты станции для выработки электроэнергии. Причём для сооружения данной плотины был применён не общепринятый, а взрыво-набросной метод строительства: с помощью крупномасштабного массового взрыва (КМВ) 2000 т ВВ, произведённого на правом борту каньона 22 декабря 2009 г. Многослойное тело плотины КГЭС-2, сформированное в результате КМВ и последующей досыпки до проектного уровня традиционным способом, получилось неоднородным как по своим геотехническим, так и по геофильтрационным свойствам.

В 2012-2014 г.г. НИЦ «ГЕОПРИБОР» в целях регулярного слежения за режимом фильтрации в теле, основании и бортовых примыканиях плотины КГЭС-2 проводил геофизические исследования и мониторинг этого уникального гидротехнического сооружения,

результаты которых стали начальными этапами оценки устойчивости плотины КГЭС-2.

Для изучения и мониторинга состояния плотины использовались геофизические методы: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) по методу сопротивлений, называемое элетротомографией (ЭТ); сейсмическое микрорайонирование (СМР) методом шумовой томографии H/V (Накамура тест) для оценки локальных эффектов усиления сейсмических колебаний и оценки мощности различных слоёв в теле плотины. Для контроля фильтрационных процессов в теле плотины использовались пьезометрические наблюдательные скважины. Основные результаты этих исследований и мониторинга изложены в ряде публикаций /1-3/. Эти исследования послужили основой для моделирования геоструктуры и оценки устойчивости плотины КГЭС-2, результаты которых изложены ниже.

Банк данных и методология 3D моделирования. Данные, использовавшиеся для построения трёхмерных (3D) моделей плотины, были сформированы (получены) из четырёх источников информации. Трёхмерная цифровая модель рельефа (ЦМР) плотины с разрешением до 0,5 м построена на основе результатов теодолитной съёмки, выполненной в 2010 г. Данные ВЭЗ были использованы для построения и оцифровки различных по геотехническим и гидрогеологическим свойствам слоёв в теле плотины.

Информация о предполагаемом внутреннем строении плотины и геотехнических свойствах различных материалов, слагающих её тело, была получена при изучении проектно-строительной документации, включая чертежи исполнительной съёмки после взрыва и окончательной отсыпки плотины. Результаты пьезометрических наблюдений по сети наблюдательных скважин, начатых в сентябре

2010 г., использовались для построения депрессионных поверхностей и калибровки (уточнения) гидрогеологической модели.

При 3-х мерном (3D) геологическом моделировании использовался программный пакет GOCAD. С помощью этой программы удаётся достаточно точно интерпретировать геологическое строение массива горных пород, используя геофизические данные, результаты разведочного бурения, а также данные инженерно-геологических изысканий.

В рамках работы по моделированию структуры и устойчивости плотины КГЭС-2 для получения её 3-х мерной геометрической модели использовались геофизические и геотехнические данные. В частности, построенная 3D – модель в основном базируется на геоэлектрической информации, полученной в процессе мониторинга состояния плотины с помощью ВЭЗ. Процедура выглядит следующим образом: сначала в программу GOCAD вводились двумерные томографические профили (I-I, ... VIII-VIII), полученные с помощью ВЭЗ в различные периоды времени /1-3/; затем в программу вводились стратиграфические слои с различным удельным электрическим сопротивлением (УЭС), которые после оцифровки отражали структуру (строение) плотины; часть 3-х мерной модели тела плотины была построена на основе оцифрованных данных встроенных граничных областей.

Ниже, на рис. 1 показано как продольный ВЭЗ-профиль II-II был совмещён с геотехническим строением плотины. Основная часть тела плотины сложена сброшенной при взрыве раздробленной массой горных пород (1), поверх которой отсыпана часть раздробленной горной массы из воронки взрыва (2). Верхняя часть гребня плотины отсыпана гравийно-галечниковой смесью аллювиального материала (3, 4) с неопределённым составом и структурой. Внешний откос в верхнем бьефе плотины сформирован с помощью отсыпки суглинка

(5), покрытого слоем глины (6). Со стороны верхнего бьефа водохранилища был обустроен противофильтрационный экран (7), представляющий собой цепочку скважин, пробуренных до коренных пород (11), в которые нагнетался бентонитовый раствор. Второй противофильтрационный экран был обустроен вдоль гребня плотины (8). На верхнем и низовом откосах дамбы были уложены бетонные плиты (9). Вся дамба покоится на аллювиальных отложениях (10) русла р. Нарын мощностью 10-15 м, подстилаемых коренными породами (11).

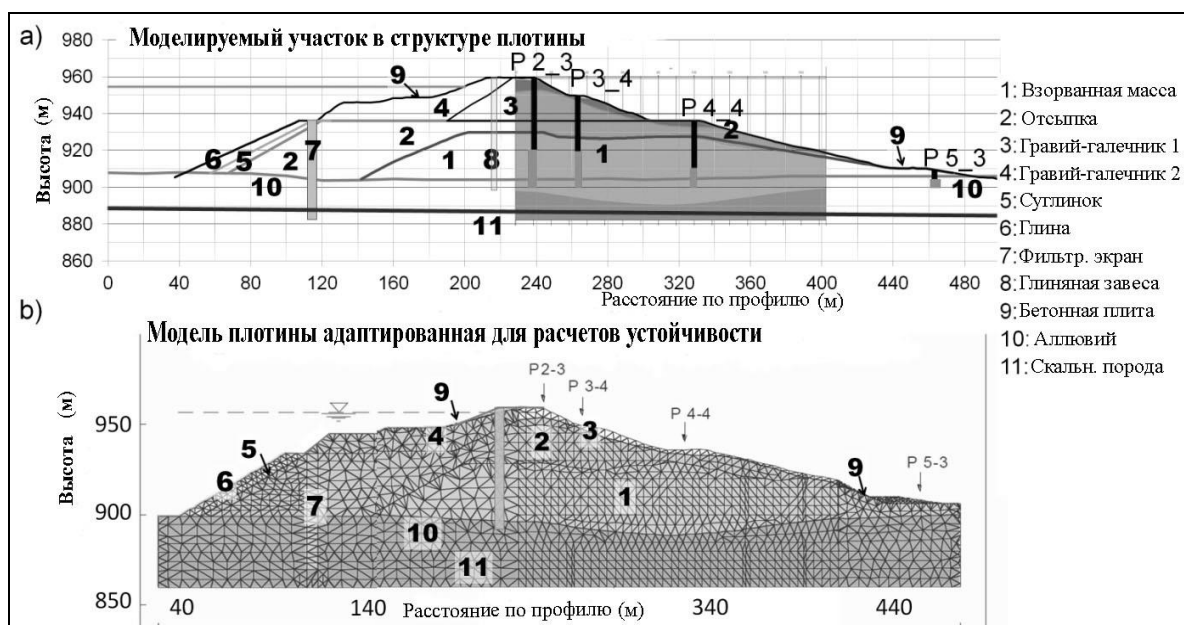


Рис. 1. Строение плотины КГЭС-2: а) Начальный профиль плотины, откорректированный с учётом основной секции моделирования, полученной из 3D модели, построенной в GOCAD; б) Конечно-элементная модель для гидрогеологического моделирования и расчетов устойчивости, построенная на основе скорректированной двухмерной части плотины.

Основные результаты 3D моделирования. Все геофизические профили были обработаны с применением ГИС-технологии, а затем отформатированы для их представления в 3D-модели, созданной с

помощью программного обеспечения GOCAD. Комбинирование (сочетание) геофизических, геотехнических данных и строения плотины позволило выделить три характерные контактные поверхности (границы) в трёхмерной модели плотины (см. пунктирные линии на рис.2), разделяющие зоны с различными УЭС.

Границы (поверхности) одного и того же типа были интерполированы для того, чтобы сформировать объёмные конфигурации различных по свойствам (УЭС) зон (рис.2с). Пространство между этими граничными поверхностями представляет собой относительно однородный материал (рис. 2d): снизу показаны аллювиальные отложения в основании плотины с низким УЭС и кровля коренных пород; выше показана масса раздробленных пород со средним УЭС, сформировавшаяся в каньоне после взрыва; сверху показан влажный материал отсыпки с низким значением УЭС и сухая гравийно-галечниковая смесь с высоким значением УЭС, отсыпанная по низовому откосу.

Гидрогеологическое моделирование выполнялось с помощью компьютерной программы GGU SS-FLOW2D на основе численного моделирования методом конечных элементов для калибровки относительно неопределённых (расчётных) коэффициентов фильтрации K_{ϕ} , предоставленных ПИИ «Гидропроект» из Кара-Куля. Необходимость калибровки была вызвана тем, что эти данные по K_{ϕ} были получены расчётным, а не опытным путём. Калибровка осуществлялась с учётом данных по пьезометрическим уровням в скважинах P2_3, P3_4, P4_4 и P5_3, расположенных по главной продольной оси плотины (рис. 1а).

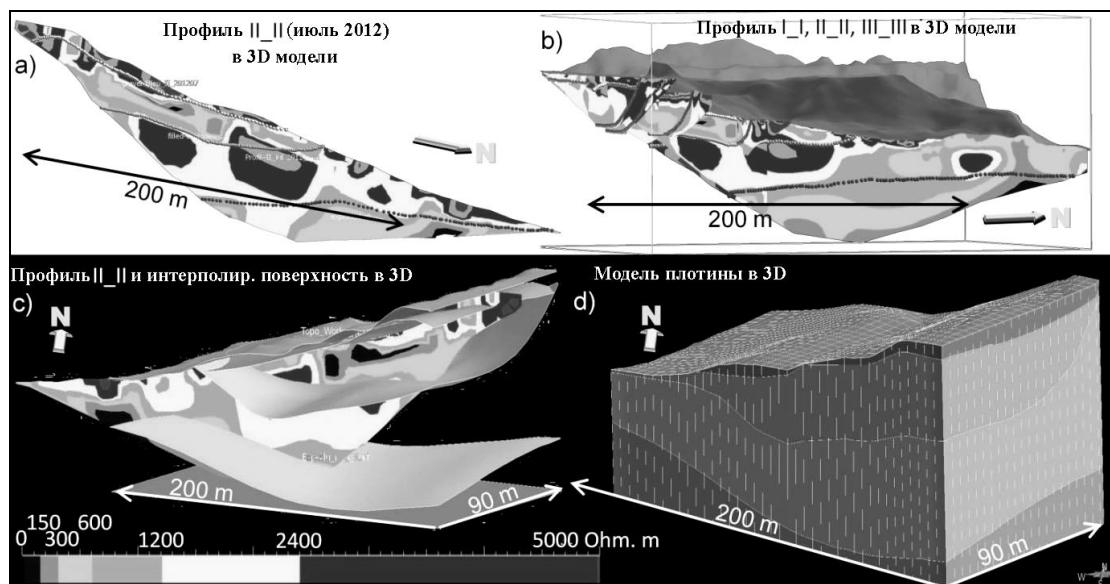


Рис.2. Профили ВЭЗ и топографическая поверхность плотины, введенные в программу GOCAD для построения 3D модели: а,б) оцифровка различных зон по УЭС; в) объёмная конфигурация границ интерполированная по данным УЭС; д) объёмная модель строения плотины по интерполированным границам.

Оценка устойчивости плотины. В качестве исходных данных для расчётов устойчивости плотины использовались сценарии с различными уровнями воды в водохранилище и, связанные с ним гидрогеологические условия. При расчётах устойчивости откосов плотины применялась компьютерная программа GGU-STABILITY, которая позволяет выполнять классические статические расчёты устойчивости, а также использовать псевдо-статические методы с учётом различных сейсмических воздействий.

Наиболее значимые предельные сценарии неустойчивости (коэффициент устойчивости $F_s \leq 1$), смоделированные при статической постановке, включали в себя: локальную или общую неустойчивость откоса в верхнем бьефе плотины (рис. 3с) соответственно при быстрой сработке (опорожнении) водохранилища за счёт большого градиента падения водной нагрузки и быстрого

уменьшения порового давления в теле плотины при полном его опорожнении.

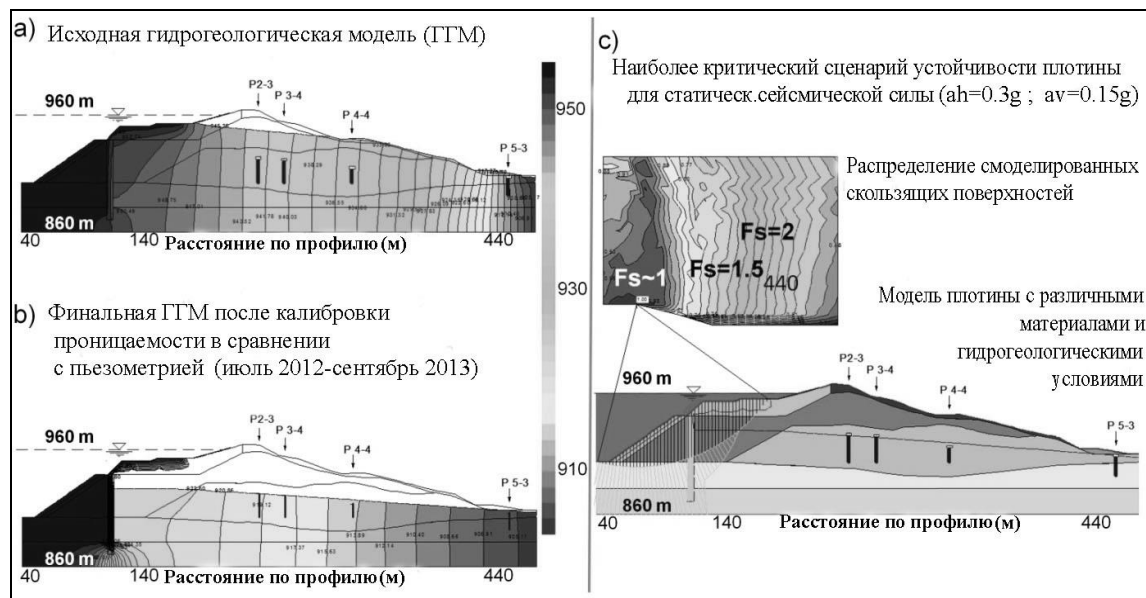


Рис.3. Гидрогеологические модели: а) с исходными значениями K_f , предоставленными ПИИ «Гидропроект»; б) с откорректированными значениями K_f , полученными путём сравнения результатов моделирования с измеренными пьезометрическими уровнями в июле 2012-сентябре 2013 г.; в) один из вариантов расчёта устойчивости плотины с наиболее критическим сценарием.

Общая неустойчивость низового откоса плотины возможна при переполнении водохранилища и переливе воды через её гребень за счёт обводнения низового откоса и соответствующего увеличения порового давления.

Следовательно, следует всячески избегать возникновения подобных ситуаций и следить за тем, чтобы они не возникали, особенно это касается варианта полного опорожнения водохранилища, хотя оно пока невозможно из-за того, входные оголовки водосбросных туннелей расположены на более высоких гипсометрических уровнях, чем дно водохранилища. В дальнейшем, при постепенном заилении водохранилища речными наносами полное опорожнение становится достижимым.

Расчёты и моделирование показывают, что плотина неустойчива (коэффициент устойчивости $F_s \leq 1$), при воздействии сейсмических нагрузок в том случае, если горизонтальная составляющая пикового ускорения грунта (ПУГ) при землетрясении превысит значение $a_h=0.3g$, а вертикальная - $a_v=0.15g$ (рис. 3с). Указанные критические значения ПУГ основаны на оценке сейсмической опасности для рассматриваемого района КГЭС-2 для землетрясений с повторяемостью один раз в 475 лет.

Сочетание экстремальных гидрологических и опасных сейсмических событий маловероятно, хотя вероятность такого сценария не равна нулю, то есть теоретически такое сочетание возможно.

Заключение. На основании результатов комплексных геофизических исследований и мониторинга состояния плотины КГЭС-2 с помощью компьютерной программы GOCAD создана трёхмерная геологическая модель плотины. При построении этой модели на основе проектных (расчётных) геотехнических данных и полученных фактических распределений удельного электрического сопротивления наибольшее внимание было уделено выявлению характерных, однородных по геотехническим и геоэлектрическим свойствам слоёв в теле плотины, с уточнением конфигураций наиболее увлажнённых зон, что имеет первостепенное значение для гидрогеологического моделирования.

Гидрогеологическое моделирование показало, что фильтрация воды из водохранилища происходит через аллювиальные отложения в основании плотины, а также в верхней её части через материал отсыпки. Со временем за счёт процессов естественной кольямации проницаемость тела плотины будет уменьшаться. Тем не менее, следует контролировать изменение депрессионной поверхности в теле плотины, особенно, после сильных землетрясений в ближней зоне.

Расчёты и моделирование показывают, что плотина неустойчива (коэффициент устойчивости $F_s \leq 1$), при воздействии сейсмических нагрузок в том случае, если горизонтальная составляющая пикового ускорения грунта (ПУГ) при землетрясении превысит значение $a_h=0.3g$, а вертикальная - $a_v=0.15g$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Торгоев И.А., Жанчаров Ж.У., Айдаралиев Б., и др. Геофизический мониторинг плотины Камбаратинской ГЭС-2 // Вестник КГУСТА, 2012, №3(37).- с. 262-268.
2. Торгоев И.А., Айдаралиев Б., Оморов Б., Торгоев А.Д. Мониторинг состояния взрывонабросной плотин Камбаратинской ГЭС-2 // Современные проблемы механики сплошных сред: Вып.17: Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии.-Бишкек:2013. С.194-209.
3. Torgoev I., Havenith H.B., Torgoev A. Geophysical monitoring of artificial landslide dam of Kambarata Hydro Power Plant -2 (Kyrgyzstan). // Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Vol.3:Targeted Lanslides. Springer, 2014.- p. 641-647.