

**Численный анализ напряженно-деформированного состояния
высокой грунтовой плотины с учетом данных натуральных наблюдений**

Салямova К. Д.¹, Амангельдиев А. Ш.², Турдикулов Х. Х.³

¹Институт механики и сейсмостойкости сооружений
Академии наук Узбекистана,

²Ташкентский Архитектурно-строительный институт
Ташкент, Республика Узбекистан,

³Ферганский политехнический институт
Фергана, Республика Узбекистан

Проектирование, строительство и эксплуатация грунтовых гидротехнических сооружений (грунтовых плотин) в сейсмических регионах ставит перед исследователями ряд задач по разработке и усовершенствованию расчетных методик оценки их прочности при различных нагрузках. Одной из главных задач по обеспечению надежной работы грунтовой плотины при нагрузках является своевременный анализ данных натуральных, визуальных наблюдений, а также контрольно-измерительной аппаратуры и устройств (КИА и У) и сверка с их критериальными значениями

В работе сопоставлены результаты данных натуральных наблюдений с расчетными, которые позволили совершенствовать методику и алгоритмы при составлении прогнозной математической модели состояния сооружения при основных нагрузках. Исследования проведены на примере высокой грунтовой плотины Чарвакской ГЭС в Узбекистане.

Начиная с ввода в эксплуатацию (1974 г.) по сегодняшнее время в соответствии с нормами [1] на каменно-земляной плотине Чарвакской ГЭС проводятся систематические натурные наблюдения: за деформациями тела плотины; поровым давлением в ядре; напряжениями в ядре; низовой упорной призме; фильтрационным режимом в основании и ядре плотины, деформациями скального основания плотины; цементационной потерной (осадки секций, раскрытие швов и трещин, напряжения в арматуре и бетоне); состоянием грунта ядра в период эксплуатации плотины; образованием трещин в ядре плотины и сейсмическими воздействиями на плотину [2, 3].

В основном КИА и У в рассматриваемом сооружении установлены на измерительных створах и шести основных ярусах по высоте. Приборы для наблюдений за фильтрацией в основании плотины, приурочены к харак-

терным геологическим и топографическим условиям основания, а также ленточные и вертикальные дренажи.

Наблюдения за напряжениями производятся в створе, расположенном в середине горизонтальной левобережной поймы, где соблюдаются условия плоской задачи. Измерение напряжений [3] в суглинистом ядре производится жесткими датчиками на четырех горизонтах. Датчики устанавливаются в сечении, перпендикулярном продольной оси плотины, плоскими розетками (по четыре прибора в розетке) для фиксации вертикальных и горизонтальных напряжений и напряжений по наклонным (под углом 45° к горизонту) площадкам.

Наблюдения за поровым давлением в суглинистом ядре и на его контакте с основанием проводятся с помощью более 100 пьезодинамометров. По мере завершения процесса консолидации ядра эти приборы используются для наблюдений за фильтрацией.

Аналізу данных натуральных наблюдений за фильтрацией, поровым давлением, осадками и смещением в высоких грунтовых плотинах с ядром посвящены работы известных ученых; Анискина Н. А., Леднева М. Н., Рассказова Л. Н. [2], Денисова Г. В. и др. В качестве примера взяты грунтовые плотины Нурекской, Чарвакской, Гоцалинской, Зейской ГЭС и др.,

Для прогнозирования состояния грунтовой плотины при основных нагрузках произведено сопоставление результатов численного расчета напряженного состояния [3–5] с данными натуральных наблюдений.

В качестве численной упругой модели сооружения рассматривается плоско-деформируемая модель (поперечное сечение) грунтовой плотины, находящаяся на упругом основании. При этом учитываются конструктивные особенности сооружения, а также кусочно-неоднородные физико-механические характеристики грунтов.

Математическая постановка задачи основана на вариационном принципе Лагранжа, согласно которому [3–5]

$$\delta A = \delta A_\sigma + \delta A_p + \delta A_p = - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V \rho g \delta v dV + \int_V \gamma h \delta v dS,$$

где $V = V_1 + V_2 + V_3$; V_1 , V_3 – объем верхней и нижней упорной призмы; V_2 – объем центрального ядра (рис. 1).

Интегралы представляют работу сил упругости (первый интеграл), массовых сил (второй интеграл) и гидростатического давления на поверхность верхового откоса (третий интеграл).

Для решения задачи по исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовой плотины при нагрузках применим численный

метод (метод конечных элементов (МКЭ)), так как практически невозможно получить аналитическое решение для кусочно-неоднородного сооружения, имеющего сложную геометрическую форму.

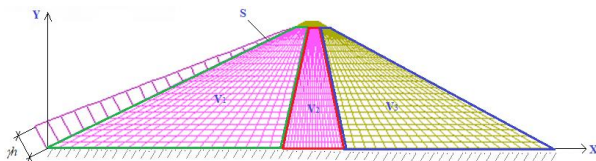


Рис. 1. Расчетная схема

Согласно МКЭ, тело делится на конечное число элементов. Элементы объединяются через узловые точки. В основу МКЭ положены относительно простые математические модели, которые приводят к большим арифметическим вычислениям. Принятая математическая модель должна достаточно точно описывать реальные свойства объектов.

Граничные условия на поверхности верхового откоса имеют вид

$$\begin{aligned} p_x &= \sigma_{xx}l_1 + \tau_{xy}m_1, \\ p_y &= \tau_{xy}l_1 + \sigma_{yy}m_1, \end{aligned}$$

где p_x, p_y – компоненты напряжений от гидростатического давления на поверхности верхового откоса, равные нулю при отсутствии гидростатического давления; l_1, m_1 – направляющие косинусы площади верхового откоса.

Граничные условия на гребне плотины:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= 0 \\ \sigma_{yy} &= 0. \end{aligned}$$

Граничные условия на поверхности низового откоса

$$\begin{aligned} \sigma_{xy}l_2 + \tau_{xy}m_2 &= 0, \\ \tau_{xy}l_2 + \sigma_{yy}m_2 &= 0. \end{aligned}$$

где l_1, m_1 – направляющие косинусы площади низового откоса.

При отсутствии гидростатики поверхность боковых откосов и гребень плотины будут свободны от нагрузок. Тогда статические граничные условия на этих поверхностях примут

$$\sigma_{ij}n_j = 0,$$

где n – вектор нормали к поверхности.

Учет гидростатики на поверхности верхового откоса плотины, находящейся в однородной несжимаемой жидкости водохранилища, сводится к заданию на поверхности откоса давления, линейно возрастающего с глубиной

$$p = \rho g z,$$

где z – глубина, отсчитываемая от свободной поверхности воды; g – ускорение свободного падения.

Граничные условия на нижней границе основания – жесткие, что выражается в отсутствии здесь горизонтальных и вертикальных возможных перемещений:

$$y = 0 : \delta u \Big|_{y=0} = 0; \delta v \Big|_{y=0} = 0.$$

С учетом разработанной методики и алгоритма решения, задача сводится к решению системы линейных уравнений, относительно перемещений

$$[K]\{u\} = \{P\},$$

где $[K]$ – матрица жесткости для всей модели, формирующаяся из матриц жесткости отдельных элементов; $\{u\}$ – искомый вектор узловых перемещений; $\{P\}$ – вектор нагрузок (силы гравитации, гидростатика).

В математическую постановку задачи входит соотношения Коши и закон Гука [3–5]. Разработанный алгоритм решения такого типа задач был протестирован путем сопоставления с решениями других авторов [3–5].

При расчетах грунтовой плотины рассматривается створ, где имеется КИА и У (данные АО Гидропроекта) высота – 131 м; коэффициенты заложения откосов – 2,2, ядра – 0,2. Физико-механические параметры грунта призм: $E = 60$ МПа, объемный вес $\gamma_{\text{сух}} = 1950$ кг/м³, $\gamma_{\text{нас}} = 2230$ кг/м³; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Параметры грунта ядра: $E = 30$ МПа, объемный

вес $\gamma_{\text{сух}} = 1760 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_{\text{нас}} = 2110 \text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, коэффициенты наклона 0,2.

Результатами решения поставленной задачи являются: поле распределения смещений (горизонтальных и вертикальных), нормальных напряжений (горизонтальных, вертикальных, касательных) (рис. 2) и их сопоставление с данными многолетних натуральных наблюдений. В данном варианте для рассматриваемой грунтовой плотины Чарвакской ГЭС эти материалы были предоставлены АО Гидропроект. Полученные в ходе решения задачи горизонтальные и вертикальные перемещения плотины указывают, что сооружение под собственным весом сплющивается (гребень опускается, откосы выпучиваются), об этом свидетельствуют значительные вертикальные перемещения гребня и противоположные знаки горизонтальных перемещений верхней и нижней призм сооружения. В основном, такая деформация (горизонтальное растяжение) наблюдается в верхней трети сооружения, что может привести здесь к потере прочности.

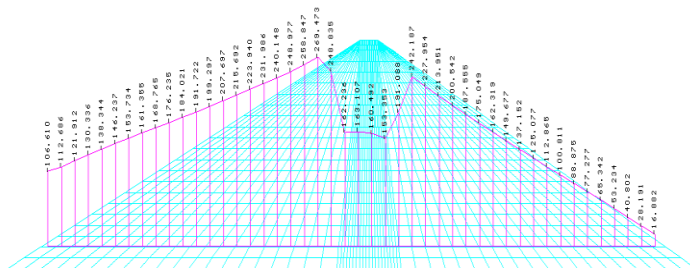


Рис. 2. Расчетные эпюры вертикальных напряжений σ_v (т/м^2) на отметке уровня воды 780,0 м

Возникающее в ядре грунтовой плотины поровое давление рассчитывается различными методами, а также с учетом и без учета консолидации грунта. При расчете был рассмотрен створ плотины, где во время строительства установлены КИА – грунтодинамометры (ГД), пьезодинамометры (ПД).

Расчетные компоненты напряженного состояния – нормальные горизонтальные, вертикальные напряжения в теле плотины, находящейся под собственным весом и гидростатики при наполнении 125 м, показаны на рис. 3, 4 показания ГД, ПД – поровое давление от времени эксплуатации.

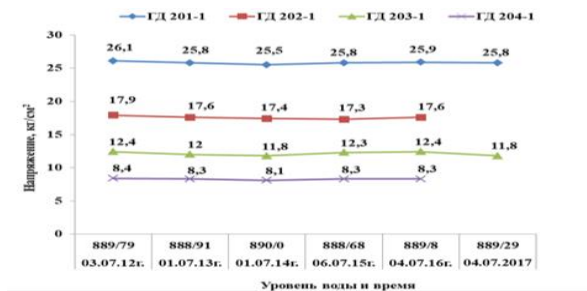


Рис. 3. Данные натурных наблюдений вертикальных напряжений σ_y (т/м^2) на отметке уровня воды 780,0 м в зависимости от срока эксплуатации

Сопоставление результатов вычислений вертикальных перемещений с натурными данными показывает разницу 8 % для створа 6 и 9 % для 9 (рис. 4, 5).

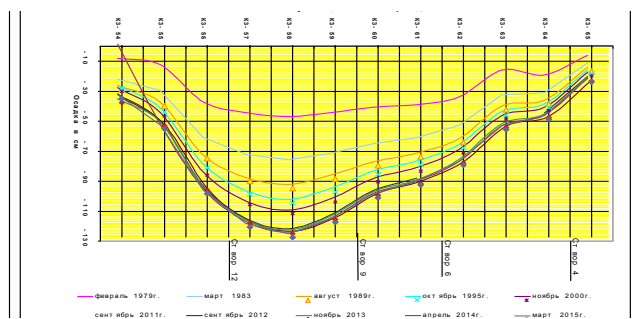


Рис. 4. Осадка бермы верхней упорной призмы плотины на отметке 872,0 м в эксплуатационный период

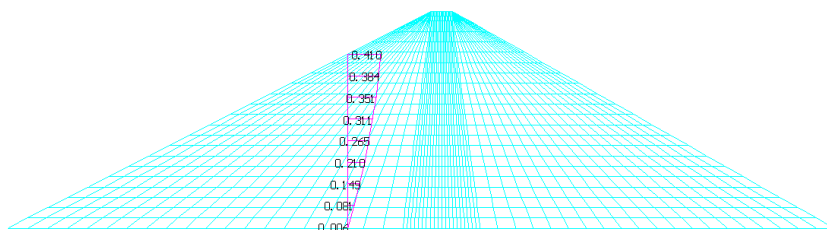


Рис. 5. Эпюры вертикальных перемещений (осадки) плотины при учете сил гравитации и гидростатики (отметка 872,0 м)

Расчетные осадки грунтовой плотины с учетом гидростатики после окончания строительства указаны на рис. 5 (7 февраля 1979 г.). Сравнение результатов вычислений с данными натуральных наблюдений по определению осадок плотины при наполнении водохранилища указало их полное совпадение, что доказывает достоверность разработанной программы расчета и полную согласованность их характера с известным решением Гольдина А. С.

Сопоставление численных результатов и натуральных данных позволили сделать выводы;

- понижение порового давления по времени отмечается на отметке 780,0 м., а также в основании вблизи потерны со стороны нижнего бьефа;
- на отметке 817,0 м понижение порового давления ощущается со стороны нижнего бьефа;
- на отметке 853,0 м со стороны нижнего бьефа поровое давление не изменяется во времени, также как и на отметке 858,0 м.
- увеличение во времени порового давления ощущается в основании плотины вблизи ядра со стороны верхнего бьефа и на отметках 817,0 м, 853,0 м также со стороны верхнего бьефа.

Анализ данных натуральных наблюдений и их сопоставление с численными результатами доказывает, что остаточное поровое давление присутствует на этих отметках и образует ядро порового давления, а процесс консолидации происходит на отметке 780,0 м, которая, как заметно на рис. 3, находится практически в основании плотины, но выше основания ядра. Следовательно, на этой отметке происходит максимальное давление от ядра плотины, упорных призм и, соответственно напора в водохранилище.

Разработанная методика и алгоритмы решения статических задач по определению напряженно-деформированного состояния для грунтовой плотины позволяет определить наиболее уязвимые участки с точки зрения возможной потерей прочности, что влияет на ее безопасность.

В глинистом ядре каменно-земляной плотины Чарвакской ГЭС рассеивание порового давления происходит очень медленно, что может способствовать формированию в теле плотины неблагоприятного напряженно-деформированного состояния, изменяющегося по времени. По мере рассеивания порового давления могут ухудшаться условия фильтрации воды в отдельных зонах ядра и на контакте ядра с основанием плотины.

Литература

1. КМК 2.06.05-98. Строительные нормы и правила. Плотины из грунтовых материалов // Минстрой республики Узбекистан. – Ташкент. – 1998. – 136 с.
2. Рассказов, Л. Н. Осадки и смещения Нурекской плотины по данным натуральных наблюдений / Л. Н. Рассказов, Е. Ядгоров // Гидротехническое строительство. – 2017. – № 2. – С. 18–24.
3. Естифеева, А. Г. Обеспечение безопасной эксплуатации грунтовой плотины Чарвакской ГЭС с учетом данных натуральных наблюдений / А. Г. Естифеева, И. Р. Мифтахова, К. Д. Саямова, Х. Х. Турдикулов // Проблемы механики. – 2020. – № 1–2. – С. 60–63.
4. Саямова, К.Д. Расчет высокой грунтовой плотины с учетом напряженного состояния и порового давления (с учетом данных натуральных наблюдений) / К. Д. Саямова, Х. Х. Турдикулов, И. Р. Мифтахова // Вестник БГТУ. – 2019. – № 7. – С. 24–32.
5. Зенкевич, О. Э. Метод конечных элементов в технике / О. Э. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 375 с.

УДК 624.131.439; 627.43

Разжижение грунтов основания Загорской ГАЭС-2 при подтоплении котлована

Колосов М. А., Моргунов К. П.
Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С. О. Макарова
Санкт-Петербург, Российская Федерация

На основе анализа аварийных случаев обрушения и оползания склонов водохранилищ и котлованов сделано предположение о том, что причинами таких аварий являются водонасыщение грунтов и вызванное им разжижение. Именно разжижение грунтов основания при наполнении бассейна нижнего бьефа является причиной аварийной просадки здания Загорской ГАЭС-2

В практике гидротехнического строительства в последние годы обратили внимание на следующее явление – при наполнении водохранилищ или котлованов строящихся объектов происходит как обрушение грунтовых массивов береговых склонов, так и просадки оснований построенных и строящихся объектов.

Так, известен случай обрушения левобережного склона берега реки Вайонт в итальянских Альпах при строительстве плотины и наполнении

256