

УДК 626-3

Numeric Design of Stress-Strain State of Plane “Earth Structure-Foundation” Model

Klara D. Salyamova* and Dinara F. Rumi

*Institute of Seismic Stability of Structures AS RUz
31 “Durmon Yuli” Str., Tashkent, 100125, Uzbekistan*

Received 11.02.2016, received in revised form 13.03.2016, accepted 12.05.2016

A study of static stress-strain state and dynamic behavior of earth hydro-technical structure (a dam) is carried out in the paper on the basis of two mutually orthogonal plane models. The study includes the structure together with surrounding rock base with weakened inclusion. Real geometry and heterogeneous physical and mechanical characteristics of soil in the dam body and foundation (presented by projecting organization) are taken into account. As a result of the research a number of offers-recommendations as to reliable and safe operation of earth dam are given.

Keywords: earth dam, earth foundation, finite element method, stresses, strains.

Citation: Salyamova K.D., Rumi D.F. Numeric design of stress-strain state of plane “earth structure-foundation” model, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(4), 536-545. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-4-536-545.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: klara_51@mail.ru

Численный анализ напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое сооружение-основание»

К.Д. Салямова, Д.Ф. Руми

*Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз
Республика Узбекистан, 100125, Ташкент, ул. «Дурмон йули», 31*

Исследуется статическое напряженно-деформированное состояние и динамическое поведение двух взаимно ортогональных плоских моделей грунтового гидротехнического сооружения (плотины) совместно с окружающим скальным основанием с ослабленным включением. При этом первая модель представляет поперечное сечение плотины на скальном основании, вторая – продольное сечение по гребню плотины с окружающим ее неоднородным скальным грунтом. Учитывалась реальная геометрия и неоднородные физико-механические характеристики грунта тела плотины и основания, предоставленные проектной организацией. По результатам работы был сделан ряд предложений-рекомендаций по надежной и безопасной эксплуатации грунтовой плотины.

Ключевые слова: грунтовая плотина, грунтовое основание, метод конечных элементов, напряжения, деформации.

Проектирование, строительство и эксплуатация особо важных ответственных сооружений, какими являются гидротехнические сооружения (плотины) в сейсмоактивных регионах Республики, требуют постоянного усовершенствования методов их расчета как на основные нагрузки (силы гравитации, гидростатическое давление воды и т.п.), так и на особые динамические, включая сейсмическое воздействие. Аварии или разрушения подобных сооружений могут привести к катастрофическим последствиям и колоссальным потерям. Поэтому достоверный прогноз поведения такого рода сооружений при тех или иных нагрузках позволит определить критерии обеспечения их надежности и безопасности при эксплуатации.

Существующие и применяемые нормативные методы расчета гидротехнического сооружения на сейсмические воздействия основаны на одномерной модели [1, 2], не отражающей пространственного поведения сооружения. В работах [3, 4] при расчетах используется модель плоскодеформируемого поперечного сечения грунтовой плотины без учета основания, так как такого рода сооружения строятся на особо прочных грунтах (обычно это известняки), не допускающих фильтрации в основании. Эта модель, однако, не позволяет учитывать неоднородность грунтового основания каньона, в котором находится плотина. В данной же работе рассмотрена плоская модель продольного сечения реальной грунтовой плотины «Т» с примыкающими бортами каньона, имеющими включения с ослабленными характеристиками грунта. При этом ставилась задача определить влияние этого включения на прочность плотины. Предложенная модель является дополнением к модели поперечного сечения, и их совместный учет позволяет исследовать пространственное поведение и напряженно-деформированное состояние сооружения при разнонаправленных сейсмических воздействиях. Кроме того, предложенная модель учитывает неоднородность или трещиноватость окружающего грунта, об-

наруженную при проведении геологических исследований; это также приближает модель к реальному сооружению.

Цель работы – исследование напряженно-деформированного состояния грунтового гидротехнического сооружения (плотины) совместно с грунтовым основанием, имеющим, как показали геологические исследования, ослабленные зоны. При исследованиях учитывалась реальная геометрия и неоднородные физико-механические характеристики грунта плотины «Т» и основания, полученные в ходе бурения на месте нахождения объекта и обработанные сотрудниками института АО «Гидропроект». По результатам работы сделан ряд предложений по надежной и безопасной эксплуатации находящейся в эксплуатации грунтовой плотины «Т».

Постановка задачи. Математическая постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии и динамическом поведении упругой плоской системы «плотина-основание» основана на вариационном принципе Лагранжа

$$\begin{aligned} \delta A &= \delta A_{\sigma} + \delta A_u + \delta A_p + \delta A_p = \\ &= -\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV - \int_V \rho \ddot{u}_i \delta u_i dV + \int_V \rho g \delta v dV + \int_S \gamma h \delta v dS = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где интегралы представляют работы сил упругости (первый интеграл), сил инерции (второй), массовых сил (третий) и гидростатического давления на поверхность верхового откоса. При решении статической задачи о НДС системы второй интеграл (работа сил инерции) удаляется из (1).

Приняты следующие граничные условия:

- нижняя грань основания жестко закреплена, т.е. здесь отсутствуют горизонтальные – u и вертикальные – v перемещения:

$$y = 0: \quad \delta u|_y = 0, = 0; \quad \delta v|_y = 0, = 0; \quad (2)$$

- на боковых гранях основания – подвижные шарниры, что допускает здесь возможность вертикальных перемещений при отсутствии горизонтальных:

$$\delta u|_x = 0,1 = 0 \quad \delta v|_x = 0,1 \neq 0;$$

гребень и нижний бьеф свободны от нагрузки:

$$\sigma_{ij} n_j = 0. \quad (3)$$

Исследования были выполнены в двух вариантах: 1 – плотина находится под действием только собственного веса и 2 – собственный вес и гидростатическое давление на верхний бьеф. В первом случае граничные условия на верхнем бьефе приняты по формуле (3). Во втором – на точку поверхности, расположенную на глубине h_1 от свободной поверхности воды, действует гидростатическое давление, определяемое по формуле

$$\sigma_{ij} n_j = \gamma h_1.$$

Выше использовались обозначения: u, v – горизонтальные и вертикальные перемещения; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; n_j – компоненты вектора нормали к поверхности; γ – удельный вес жидкости ($0,01 \text{ МН/м}^3$).

Задача решена численно методом конечных элементов. Конечно-элементные сетки моделей показаны на рисунках.

Разрешающие системы уравнений получаются в ходе конечно-элементной дискретизации и объединения элементов по узлам. Перемещения узлов и являются решением вариационного уравнения (1), реализующим экстремум функционала работы. При этом разрешающая система уравнений имеет вид

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{g\} + \{P\}, \quad (4)$$

где $[K]$, $[M]$ – матрицы жесткости и массы всей модели, формирующиеся из матриц для отдельных элементов; $\{u\}$ – искомый вектор узловых перемещений; g – ускорение свободного падения ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$); $\{P\}$ – вектор гидростатической нагрузки.

Решение системы алгебраических уравнений (4) осуществляется методом Гаусса, по полученным перемещениям $\{u\}$ определяются компоненты деформации (по формулам Коши) – ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} и (по закону Гука) – напряжения σ_x , σ_y , τ_{xy} для всех точек упругой плоской модели «плотина-основание».

Результаты. Рассматривались две взаимно ортогональные плоские модели для грунтовой плотины «Т», эксплуатирующейся в Узбекистане. Используемые при расчетах физико-механические параметры грунта сооружения и основания были предоставлены институтом АО «Гидропроект».

Первая рассматриваемая плоская модель (рис. 1) соответствует *продольному* сечению плотины по гребню (индекс 1 на рис. 1) с усредненными параметрами: модуль упругости $E_{11} = 70$ МПа; плотность $\rho_1 = 2284 \text{ кг/м}^3$; коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,3$. Окружающий плотину грунт, согласно геотехническим показателям результатов опытного бурения, представляет собой известняк (3) с включением (2 – гипсоангидрит). Расчетные характеристики грунтов основания: известняк – $E_3 = 13000$ МПа, $\rho_3 = 2560 \text{ кг/м}^3$, $\nu_3 = 0,3$; грунт ослабленной зоны (гипсоангидрит) – $E_2 = 16$ МПа, $\rho_2 = 1580 \text{ кг/м}^3$, $\nu_2 = 0,3$.

Было исследовано напряженно-деформированное состояние плоской области (рис. 1) под действием собственного веса и оценено влияние на компоненты НДС наличия в основании ослабленной зоны.

На рис. 2 показано распределение вертикальных перемещений модели с однородным (а) и неоднородным (б) грунтом основания, где ослабленная зона расположена под левым бортом и дном каньона. Результаты получены под действием только собственного веса. Следует отметить, что на приведенных рисунках увеличение интенсивности окраски не означает увеличения значений компонент напряженного состояния. Поэтому достигнутые максимумы соответствующих компонент и их расположение оговариваются в тексте.

По результатам видно, что при однородном скальном основании (известняк) вертикальному сжатию подвергается в основном только область плотины (рис. 2а), при наличии же ослабленной зоны помимо тела плотины значительной усадке подвержена и область скального основания, расположенная над ослабленной зоной (рис. 2б). При этом значительно, почти на 1 м, увеличивается вертикальное смещение центральной части гребня плотины.

Представленные результаты дают общую картину распределения компонент напряженного состояния модели (рис. 1) под собственным весом при наличии или в отсутствие осла-

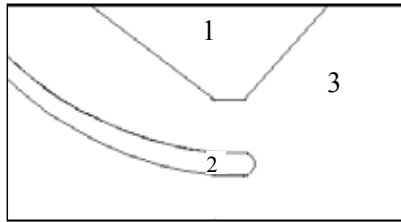


Рис. 1. Плоская модель продольного сечения грунтовой плотины (1) в неоднородном грунте (3) с включением (2)

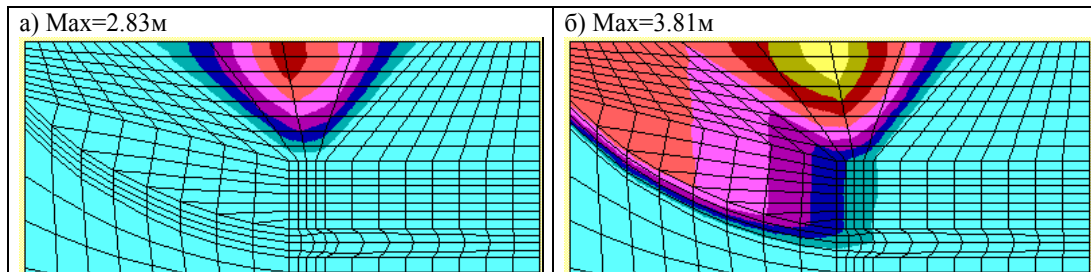


Рис. 2. Вертикальные перемещения модели «плотина-основание» с однородным (а) и неоднородным (б) основанием

бленной зоны в основании. Однако для количественной оценки в расчетах на прочность при сложном напряженном состоянии оперируют эквивалентным напряжением, позволяющим определить переход материала из упругого состояния [5]. Эквивалентное напряжение определяется по формуле, в которую входит комбинация главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$:

$$\sigma_{\text{эkv}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}.$$

Определенные по этой формуле эквивалентные напряжения представлены на рис. 3. Используя в качестве критерия перехода из упругого состояния в пластическое энергию формоизменения (критерий Хубера-Мизеса), можно констатировать, что наиболее напряженной является область контакта плотины с бортом каньона, находящимся над ослабленной зоной, а также область от правой границы ослабленной зоны до нижней границы плотины. Здесь отмечаются наибольшие эквивалентные напряжения (около 67МПа – рис. 3б), являющиеся обобщенной характеристикой напряженного состояния, и именно здесь в первую очередь возможно разрушение или пластическое деформирование модели с неоднородным основанием. В случае же однородного грунтового основания эквивалентные напряжения равномерно распределяются по высоте модели (рис. 3а), доходя до максимального в этом случае значения 8,48 Па на жесткой нижней границе модели.

При исследовании динамического поведения грунтовой плотины «Т» была изучена вторая плоская модель, представляющая собой поперечное сечение грунтовой плотины. Модель также рассматривается в двух вариантах: с однородным основанием и основанием, имеющим

ослабленную зону, простирающуюся по диагонали области основания: от верхнего левого до нижнего правого угла (рис. 4).

Динамическое поведение во многом зависит от динамических характеристик объекта. Так, при расчетах сооружений на сейсмические воздействия определяется сейсмическая нагрузка, формула которой имеет вид [1]

$$S_{ik} = K_1 K_2 Q_k A \beta_i K_{\psi} \eta_{ik}.$$

В формулу включены различные коэффициенты, среди которых: коэффициент расчетной сейсмичности A , зависящий от балльности предполагаемого землетрясения; Q_k – вес,

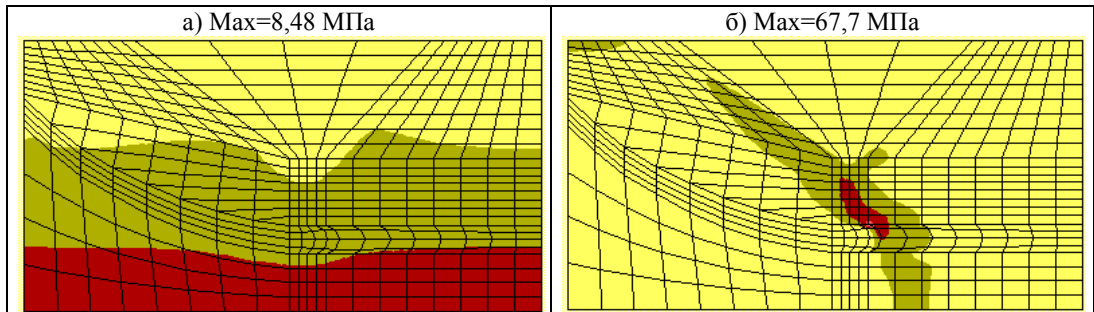


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в модели «плотина-основание» с однородным (а) и неоднородным (б) основанием под собственным весом

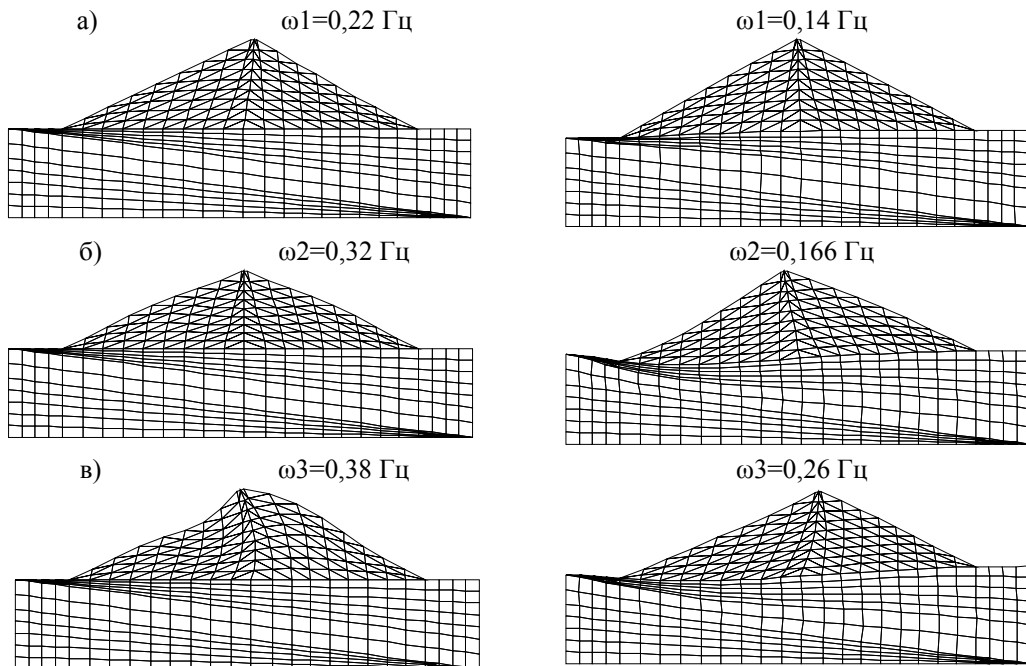


Рис. 4. Основные частоты и соответствующие формы собственных колебаний плотины на однородном (слева) и неоднородном (справа) основании

приходящийся на k -й узел сооружения; η_{ik} – коэффициенты собственных форм колебаний сооружения, полученные при решении задачи на собственные значения; коэффициент динамичности β_i – обратно пропорциональный i -му периоду собственных колебаний, учитываемых при расчете.

Таким образом, основой динамического расчета сооружений является определение его динамических характеристик – частот, особенно тех, которые способны вызвать интенсивные колебания сооружения по причине их близости к частотному спектру сейсмических колебаний в данном регионе и соответствующих этим частотам форм колебаний.

В ходе решения задачи на собственные значения были получены динамические характеристики (частоты и формы) плотины «Т» ($H = 165\text{м}$) в двух вариантах: на однородном скальном основании (без ослабленной зоны) ($E = 13\,000\text{ МПа}$, $\rho = 2,56\text{ т/м}^3$, коэффициент Пуассона 0,3) и на скальном основании с ослабленной зоной. Физико-механические характеристики грунта ослабленной зоны – $E = 16\text{ МПа}$, $\rho = 1,58\text{ т/м}^3$, коэффициент Пуассона 0,3. Коэффициенты верхового и низового откосов плотины приняты равными соответственно 2 и 1,9. Физико-механические параметры грунта плотины: ядро $E = 15\text{ МПа}$; $\rho = 2100\text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,3$ (суглинок); бьефы: верхний $E = 70\text{ МПа}$; $\rho = 2284\text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,25$ (камень); нижний $E = 70\text{ МПа}$; $\rho = 2040\text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,25$ (камень); основание (прямоугольная плита толщиной 165м) – скальное $E = 13\,000\text{ МПа}$; $\rho = 2560\text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,3$ (известняк).

Разрешающей системой задачи отыскания собственных колебаний является уравнение (4) с нулевой правой частью. А задача сводится к решению алгебраической проблемы на собственные значения.

Полученные формы колебаний с указанием частот приведены на рис. 4. Здесь деформированное состояние по формам показано на фоне конечно-элементной сетки. По всей диагонали в основании располагается ангидридная зона, равномерная по толщине, с высотой в два конечных элемента: слева – в случае однородного основания – параметры этой полосы выбраны такими же, как и в окружающем грунте; справа – параметры этой полосы соответствуют параметрам ангидридной зоны.

Сравнение основных форм и частот на рис. 4 показывает, что наличие ослабленной зоны в основании изменяет спектр основных частот: он заметно уменьшается, поскольку уменьшается за счет ослабленной зоны и жесткость основания. Основные формы при однородном скальном основании (слева) представлены деформацией сооружения как менее жесткой части модели: сдвигом (1-я форма), усадкой (2-я форма) и сложной формой поперечных колебаний (3-я форма). При наличии же ослабленной зоны (справа) основная деформация приходится на полосу основания. Это видно и на рис. 5, и на рис. 6, где по основным, наиболее энергоемким формам показаны характерные перемещения и эквивалентные напряжения. Для случая с однородным основанием характерными являются горизонтальные перемещения, а при неоднородном – вертикальные.

Темным цветом обозначены участки с преобладающей деформацией при основной форме колебаний модели плотины с однородным (горизонтальный сдвиг – а) и неоднородным (вертикальная осадка – б) основанием. Светлые участки моделей при основной форме колебаний деформации практически не подвержены.

Результаты на рис. 5 демонстрируют симметричную картину распределения исследуемых компонент напряженно-деформированного состояния при первой форме колебаний, представ-

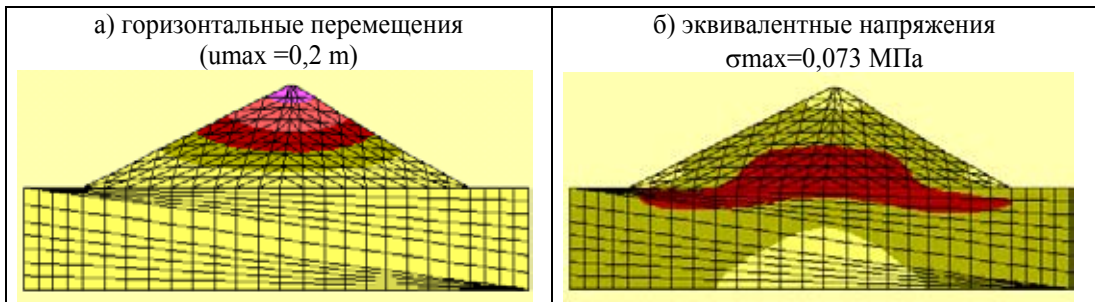


Рис. 5. Распределение горизонтальных перемещений (а) и эквивалентных напряжений (б) в сечении плотины на однородном скальном основании при сдвиге по первой форме

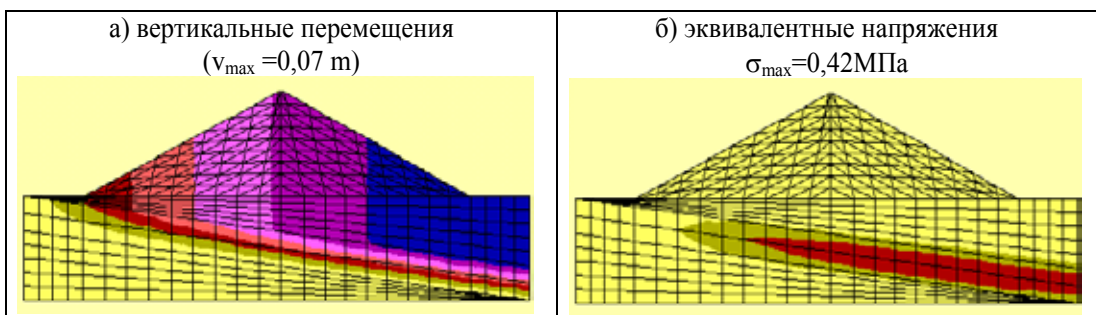


Рис. 6. Вертикальные перемещения (а) и эквивалентные напряжения (б) для модели «плотина-неоднородное основание» при основной (вертикальной) форме колебаний

ляющей поперечный сдвиг плотины. Наибольшие горизонтальные перемещения достигаются на гребне (почти до 0,2 м на рис. 5а), а наибольшие эквивалентные напряжения (0,0725 МПа) достигаются на контакте сооружения с жестким основанием (темная зона на рис. 5б). Результаты рис. 6, напротив, дают несимметричную картину вертикальной осадки плотины, инициируемую наличием ослабленной зоны. При этом осадок равномерно увеличивается по всему основанию сечения, достигая 0,07 м на нижней призме. Вертикальной осадке подвержена и область основания, находящаяся над ослабленной зоной. Ниже этой зоны вертикальные перемещения основания отсутствуют. Максимальные напряжения в неоднородном основании приходятся на зону контакта с ослабленной зоной (0,42 МПа) (рис. 6б).

Таким образом, первая форма плотины на однородном основании (рис. 5а) представлена горизонтальными смещениями и минимальной вертикальной осадкой, почти не затрагивающими область основания. Вертикальная же осадка модели с неоднородным основанием максимальна внутри ослабленной зоны, вызывая наибольшие вертикальные перемещения верхней части основания и находящегося на нем сооружения. Таким образом, ослабленная зона, расположенная вдоль всего центрального сечения плотины, представляет своего рода амортизатор, принимающий на себя осадку плотины вместе с верхней частью скального основания.

Выводы. Разработана методика по определению напряженно-деформированного состояния грунтовых плотины по взаимно ортогональным направлениям, позволяющая учитывать

конструктивные особенности сооружения, неоднородность основания на дне и вдоль бортов каньона. Разработанная методика включает расчеты на статические (собственный вес, гидростатическое давление) и динамические (сейсмические) нагрузки.

На основании представленных результатов можно сделать вывод о необходимости учета неоднородности основания при расчете грунтовых сооружений. Для этой цели необходим сбор данных геологоразведки о параметрах подстилающих грунтов и о наличии в основании ослабленных зон, способных привести к неоднородной осадке грунта и находящегося на нем сооружения.

Неравномерная осадка основания при наличии в нем ослабленной зоны приводит к неравномерной осадке сооружения, происходящей под действием собственного веса, возникновению трещин в теле самой плотины, а также на контакте плотины с бортом каньона, находящимся над ослабленной зоной.

Динамический расчет грунтовой плотины с основанием, включающий предварительное определение динамических характеристик модели «плотина – основание», также был выполнен с учетом данных, полученных в результате геологоразведочных работ и указывающих на наличие в скальном основании ослабленной зоны. Результаты выявили неравномерную осадку сооружения и части основания, обусловленную наличием ослабленной (гипсоангидритовой) зоны.

Выполненные статические и динамические расчеты не представляются противоречащими, а потому свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

Таким образом, ослабленная зона в основании вызывает неравномерную осадку сооружения и концентрацию напряжений на контакте сооружения с бортом каньона над ослабленной зоной, способные вызвать сдвиг в указанных областях.

Для надежной эксплуатации возведенной плотины и недопущения его дальнейшей неравномерной осадки, которая, как показали проведенные исследования, вполне возможна при наличии в основании ослабленного включения, необходимо проведение соответствующих мероприятий (например, цементация) с целью укрепления этой зоны. Результаты исследований и предложения, выполненные в содружестве с институтом АО «Гидропроект», были переданы в эксплуатирующую организацию.

Список литературы

[1] Синицын А.П. *Практические методы расчета сооружений на сейсмические нагрузки*. М.: Стройиздат, 1972. 512 с. [Sinityn A.P. *Practical Methods of Structure Calculation on Seismic Loads*. – Moscow: Stroyizdat, 1972. 512 p. (In Russian)]

[2] Салямова К.Д., Руми Д.Ф. Динамика грунтового сооружения с учетом сухого и вязкого трения в грунте. *Научно-технический и производственный журнал Горный Вестник Узбекистана*. 2015, 1, 78-81 [Salyamova K.D., Rumi D.F. Dynamics of Earth Structure with Dry and Viscous Friction in Soil. *Science and Technology J. Mining Information (Vestnik) in Uzbekistan*, 2015, 1. 78-81. (In Russian)]

[3] Салямова К.Д., Руми Д.Ф. Динамика грунтового гидротехнического сооружения с учетом реологических свойств грунта. *Научно-теоретический журнал Вестник БГТУ*. 2015, 3, 16-35. [Salyamova K.D., Rumi D.F. Dynamics of Earth Hydro-Technical Structure with Consideration

of Rheological Characteristics of Soil. *Science and Technology J. BGTU Vestnik*. 2015, 3. 16-35. (In Russian)]

[4] Салямова К.Д., Руми Д.Ф. *Динамика грунтовых плотин*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 150 с. [*Salyamova K.D., Rumi D.F. Dynamics of Earth Dams* LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 150. (In Russian)]

[5] Фадеев Д.К., Фадеева В.Н. *Вычислительные методы линейной алгебры*. М.: Физматгиз, 1965. 334 с. [*Fadeev D.K., Fadeeva V.N. Computational Methods of Linear Algebra*. Moscow: Fizmatgiz. 1965. 334. (In Russian)]