

УЎТ: 539.3

## СТАТИК КУЧЛАР ТАЪСИРИДА ГРУНТЛИ ТЎҒОНЛАРНИНГ КУЧЛАНГАНЛИК-ДЕФОРМАЦИЯ ҲОЛАТИНИ ВА МУСТАҲКАМЛИГИНИ БАҲОЛАШ

*П.Ж.Маткаримов – т.ф.д., профессор, Наманган муҳандислик технология институти,  
Д.Жураев – таянч докторант, “Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институти” миллий тадқиқот университети.*

### Аннотация.

Мақола Ҳисорак тўғонининг хусусий оғирлиги ва сувнинг гидростатик босимини ҳисобга олган ҳолда тўғоннинг кучланганлик-деформация ҳолатини ва мустаҳкамлигини баҳолашга бағишланган. Тадқиқот ишида Лагранжнинг вариацион тенгламасидан фойдаланган ҳолда қўйилган масалани ҳал қилиш учун математик модель ишлаб чиқилган. Моделнинг адекватлиги, алгоритм ва дастурнинг тўғрилигини бир қатор масалаларни ечиш орқали аниқланган. Шу билан бирга, грунтли тўғонларнинг кучланганлик-деформацияланиш ҳолати ва мустаҳкамлиги тўғон грунтларининг физик-механик хусусиятларига, геометрик ўлчамига, юқори ва пастки таянч призмаларнинг нишаблигига ва сув омборининг тўлдирилганлик даражасига боғлиқ бўлади. Ҳисоблаш усули сифатида чекли элементлар усули танланган.

**Таянч сўзлар:** грунтли тўғонлар, вариацион тенглама, кучланганлик-деформация ҳолати, мустаҳкамлик, сувнинг гидростатик босими.

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

*П.Ж.Маткаримов – д.т.н, профессор, Наманганский инженерно-технологический институт,  
Д.Жураев – докторант. Национальный исследовательский университет “Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства”.*

### Аннотация

Статья посвящена исследованию напряжённо-деформированного состояния (НДС) и оценки прочности Гиссаракской грунтовой плотины в плоской постановке под действием массовых сил и гидростатических давлений воды. В работе разработана математическая модель для решения поставленных задач с использованием вариационного уравнения Лагранжа. Адекватность модели, точность алгоритма и программы проверена решением ряда тестовых задач. При этом выявлено, что напряжённо-деформированное состояние и прочность исследуемых грунтовых плотин существенно зависят от физико-механических свойств грунтов, соизмеримости геометрических размеров и коэффициентов откосов упорных призм плотин, а также от уровня заполнения воды в водохранилищах. В качестве вычислительного аппарата в работе используется метод конечных элементов.

**Ключевые слова:** грунтовые плотины, вариационная уравнения, напряжённо-деформированное состояние, прочность, массовая сила.

## STRESS-STRAIN STATE AND STRENGTH OF EARTH DAMS UNDER STATIC LOADS

*P. J. Matkarimov Doctor of Technical Sciences, professor, Namangan Institute of Engineering and Technology,  
D. Juraev doctoral student, “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers” National Research University.*

### Abstract

The article is devoted to the study of the stress-strain state (SSS) and the assessment of the strength of the Gissarak earth dam in a plane statement under the action of body forces and hydrostatic pressure. A mathematical model, algorithm and computer program for studying the stress-strain state and assessing the strength of structures are developed in the article using the Lagrange variational equation. The finite element method was used in the problem solution. The adequacy of the model, the accuracy of the algorithm and program were verified by solving a number of test problems. It was revealed that the stress-strain state and strength of the studied earth dams significantly depend on the physical and mechanical properties of soils, the commensurability of geometric dimensions and slope coefficients of the dam retaining prisms, as well as on the level of water filling in reservoirs.

**Key words:** earth dam, stress-strain state, strength, body forces, hydrostatic pressure.

**Введение и анализ современного состояния проблемы.** В грунтовых плотинах под влиянием собственного веса и гидростатического давления воды происходит сложное взаимодействие между отдельными частями плотины. В ряде случаев под влиянием указанных факторов в теле плотины и ее противоплотинных устройствах появляются растягивающие напряжения, что может привести к образованию в них трещин и

нарушение прочностных характеристик плотин в целом. Задача исследований напряжённо-деформированного состояния и оценка прочности грунтовых плотин является сложной задачей механики деформируемого твёрдого тела, при решении которой необходимо учитывать свойства материалов, конструктивную особенность сооружений, сроки строительства, эксплуатации, разновидность действующих нагрузок и т.п. Решение такой зада-

чи в настоящее время затруднительно ввиду отсутствия достаточно обоснованных данных о нелинейных и реологических свойствах грунтов, сложности одновременного учета влияния всех возможных факторов при численной реализации решения и т.д. В то же время решение частных задач с принятием определенных допущений и предположений, наиболее полно и точно можно получить, пользуясь численными методами, например, методом конечных элементов (МКЭ) или методом конечных разностей [1-5].

На сегодняшний день существует ряд научных работ, которые посвящены исследованиям напряженно-деформированного состояния и оценке прочности грунтовых плотин с использованием различных моделей сооружений.

Статические и динамические напряжённые состояния различных грунтовых плотин рассмотрены в работах [6-14], в которых учитываются конструктивные особенности сооружений, нелинейных и влажностные свойства грунта, взаимодействие сооружений с водной средой водохранилища и другие особенности сооружений. В работе [15] проведен обзор и анализ результатов исследований напряженно-деформированного состояния каменно-набросных плотин с железобетонным экраном, выполненных разными авторами. Рассмотрены результаты аналитических, экспериментальных и численных исследований. Описаны модели, использованные для воспроизведения нелинейного характера деформации экрана и каменной наброски при численном моделировании НДС плотин.

В работе [16] представлены результаты исследования в плоской постановке оценки напряженно-деформированного состояния грунтовых высоких плотин в зависимости от времени (анализ консолидации). Проанализированы некоторые результаты расчетов по определению влияния парового давления воды на напряженно-деформированное состояние и осадки плотины. В работе [17] систематически обобщается накопленный опыт строительства высоких каменно-земляных плотин, обсуждаются основные технические вопросы, в том числе контроль деформаций, просачивания, устойчивости откосов, оценка безопасности и другие вопросы, касающиеся грунтовых плотин. В работе [18] методом конечных элементов исследуется напряженное состояние грунтовых плотин при статических и динамических воздействиях с учётом упруго-пластического деформирования грунта плотины и полученные численные результаты сопоставляются с результатами полевых измерений Вэньчуаньского землетрясения.

Как показывает обзор, исследования напряженно-деформированного состояния и оценка прочности грунтовых плотин с учётом конструктивных особенностей и реальной работы сооружений исследованы недостаточно, поэтому проведение исследований в этом направлении представляет большой научный интерес. Прогноз поведения грунтовых плотин должен основываться на возможно более полном учёте всех факторов, влияющих на их НДС и прочность при различном роде нагрузок.

Данная работа посвящена разработке методики расчёта НДС и определению прочностной характеристики Гиссаракской плотины в плоской постановке с учётом конструктивных особенностей сооружения, свойств материалов и степени заполнения водохранилища. При решении задачи используется метод конечных элементов.

## 2. Постановка задачи и методы решений

На рис. 1 представлена расчетная схема грунтовой плотины сложной геометрии, занимающее объём  $V = V_1 + V_2 + V_3$  ( $V_1, V_3$  - объём верхней и нижней призмы,  $V_2$  - объём ядра) жёстко заземлены в основании  $\Sigma_0$ , а поверхность нижнего откоса и гребня свободны от напряжения. Грунтовая плотина находится под действием массовых сил  $\vec{f}$  и на поверхность  $\Sigma_1$  приложено гидростатическое давление воды  $p$ .

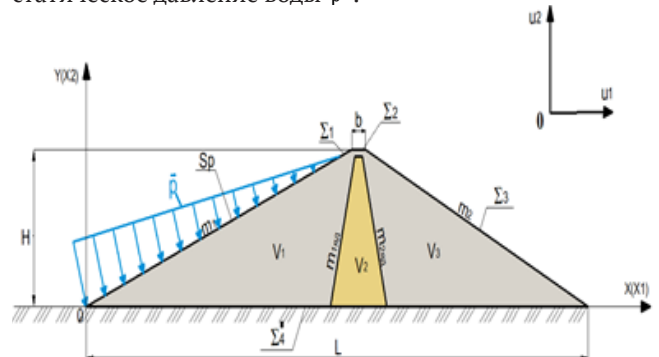


Рис. 1. Расчётная схема грунтовой плотины

Для математической постановки задачи использован принцип возможных перемещений, согласно которому сумма работ всех активных сил, действующих на систему при возможных перемещениях равна нулю [5]:

$$\delta A = - \int_{V_1} \sigma_{ij} \cdot \delta \varepsilon_{ij} dV - \int_{V_2} \sigma_{ij} \cdot \delta \varepsilon_{ij} dV - \int_{V_3} \sigma_{ij} \cdot \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V \vec{f} \cdot \delta \vec{u} dV + \int_{\Sigma_1} \vec{p} \cdot \delta \vec{u} d\Sigma = 0, \quad i, j = 1, 2 \quad (1)$$

Для дальнейшей постановки задачи также используются обобщенный закон Гука [19],

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \lambda \theta + 2\mu \varepsilon_{11} \\ \sigma_{22} &= \lambda \theta + 2\mu \varepsilon_{22} \\ \sigma_{12} &= \mu \varepsilon_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

соотношение Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

и граничные условия

$$\vec{x} \in \Sigma_0: \vec{u} = 0 \quad (4)$$

В расчетах рассматриваются различные уровни заполнения водохранилища, при этом гидростатическое давление воды на напорной грани плотины определяется по формуле

$$p = \rho_0 g (h - x_2) \quad (5)$$

здесь:  $\vec{u}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  - векторы перемещений, компоненты тензоров деформации и напряжений;  $\delta \vec{u}$ ,  $\delta \varepsilon_{ij}$  - изохронные вариации компонентов вектора перемещений и тензоров деформации;  $\rho$  - плотность материала тела;  $\rho_0$  - плотность воды,  $(h - x_2)$  - уровень заполнения водохранилища,  $\vec{f}$  - вектор массовых сил;  $p$  - гидростатическое давление воды, действующее на поверхности  $\Sigma_1$ ;  $\lambda$  и  $\mu$  - константы Ламэ;  $\theta = \varepsilon_{kk}$  - объёмная деформация;  $\{u_i, u_j\} = \{u, v\}$  - компоненты вектора перемещений точки тела;  $\{x\} = \{x_1, x_2\} = \{x, y\}$  - координаты точки тела  $i, j, k = 1, 2$ .

Необходимо определить в теле плотины (рис.1) функции перемещений  $\vec{u}(\vec{x})$ , деформации  $\varepsilon_j(\vec{x})$  и напряжений  $\sigma_j(\vec{x})$ , возникающих под действием массовых ( $\vec{f}$ ) и

поверхностных ( $\vec{p}$ ) сил, удовлетворяющих уравнениям (1)-(3) и граничным условиям (4) при произвольных возможных перемещениях  $\delta \vec{u}$ .

Для решения вариационной задачи (1) - (3) для области неканонической сложной формы наиболее удобным является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет учесть как особенности геометрии, так и свойства материала конструкции. Здесь, область занятая телом, разбивается на подобласти с различными физико-механическими характеристиками, затем подобласти автоматически разбиваются на треугольные конечные элементы первого порядка с 6 – ю степенями свободы.

Использование процедуры метода конечных элементов позволяет сводить рассматриваемую вариационную задачу (1)-(4) к системе неоднородных алгебраических уравнений высокого порядка, т.е.:

$$[K]\{u\} = \{P\} \quad (6)$$

здесь:  $[K]$ - матрица жесткости для рассматриваемого тела (рис.1);  $\{u\}$  - искомые компоненты векторов перемещений, в узлах конечного элемента;  $\{P\}$ - компоненты внешних (массовых и поверхностных) сил, действующей на узлы конечного элемента.

При решении выше поставленных задач использовалась разработанная нами программа расчета на ЭВМ.

**Результаты и обсуждение.**

В работе исследуется напряжённо-деформированное состояние (НДС) и оценивается прочность грунтовых плотин в плоской постановке, под действием массовых сил и гидростатического давления воды. При исследованиях влияния воды на НДС и прочности плотин рассматривались различные уровни заполнения воды, т.е. постепенность заполнения водохранилища.

С помощью выше приведённой математической модели и метода исследуется НДС и прочность различных плотин под действием воды в верхнем бьефе, собственного веса сооружения, с учётом реальных физико-механических характеристик грунтов и конструктивных особенностей рассматриваемых плотин.

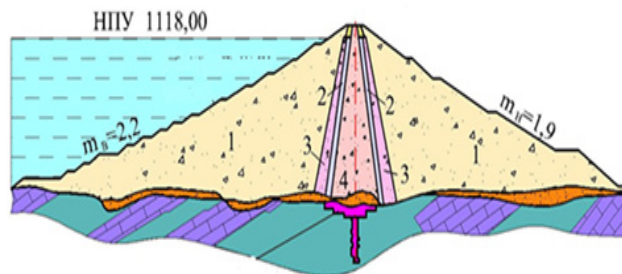


Рис. 2. Поперечное сечение Гиссаракской плотины 1 - упорные призмы, 2 - I слой переходных зон, 3 - II слой переходных зон, 4 - ядро.

Исследование проводилось для Гиссаракской грунтовой плотины, основные геометрические и конструктивные особенности которых имеют вид:

Гиссаракская плотина (рис. 2) высотой  $H=138.5$  м на реке Аксу Кашкадарьинской области Узбекистана, с коэффициентами откосов  $m_b=2.2$ ,  $m_n=1.9$ . Упорные призмы 1 уложены из горной массы с физико-механическими параметрами -  $E=3600$  МПа, удельный вес грунта -  $\gamma=1.9$  тс/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона -  $\nu=0.3$  и коэффициент сцепления  $C= 2$  кПа. Ядро 4 уложено из суглинки с физико-механическими параметрами -  $E=2400$  МПа, удельный вес грунта -  $\gamma=1.7$  тс/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона -  $\nu=0.35$  и коэффициент сцепления  $C= 20$  кПа. Переходная зона из песчано-гравелистого грунта. Гребень плотины шириной  $b=16$  м и длиной  $L=660$  м.

Поставленная задача решается в два этапа: на первом этапе расчета рассматривается НДС грунтовой плотины под действием собственного веса и гидростатического давления воды; а на втором этапе с использованием результатов для напряжений, полученных на первом этапе расчета, оценивается прочность плотины с использованием теории прочности Кулона - Мора.

На первом этапе расчета определяется НДС для центрального главного поперечного сечения плотины в плоской постановке. Для удобства анализа результатов в поперечном сечении плотины построены изолинии ком-

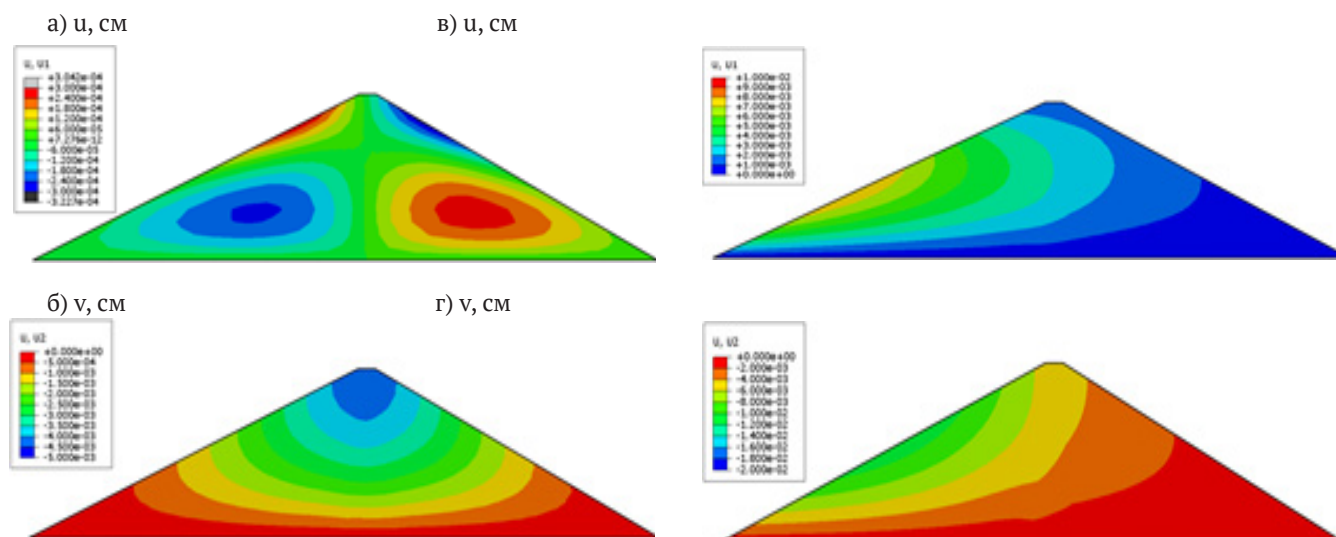


Рис. 3. Поля равных уровней перемещений (u и v) Гиссаракской плотины при пустом (а, б) и в полном заполнения водохранилища (в, г).



понентов перемещений и напряжений которые приводятся ниже.

На рис. 3 приведены поля равных уровней горизонтальных (а, в) и вертикальных (б,г) перемещений Гиссаракской плотины в плоской постановке под действием собственного веса и гидростатического давления воды при пустом и полном заполнении водохранилища.

Анализ полученных результатов (рис. 3 а и б) показывает, что перемещения точек в теле плотины имеют примерно симметричный характер относительно вертикальной оси плотины. В ядре плотины значение горизонтальных перемещений близки к нулю, а их величина увеличивается к центрам верхней и нижней упорных призм. При этом перемещение точки в вертикальном направлении преобладает. Это объясняется тем, что расчёты производились с учётом только собственного веса плотины. В точках, расположенных в верхних уровнях сооружения значения перемещений больше, чем в точках нижнего

В рис.4 приведены поля равных уровней горизонтальных  $\sigma_{11}$  (а), вертикальных  $\sigma_{22}$  (б) и касательных  $\sigma_{12}$  напряжений Гиссаракской плотины под действием собственного веса и гидростатического давления воды при пустом и полном заполнении водохранилища.

Полученные результаты показывают, что в зонах, близких к контуру плотины напряжения практически нулевые, что объясняется отсутствием нагрузки на поверхности гребня и откосов. НДС в целом имеет почти симметричный характер относительно вертикальной оси плотины. А линий нулевого уровня касательных напряжений -  $\sigma_{12}$  проходят по центральной оси симметрии плотины. С удалением от этой оси величины  $\sigma_{12}$  возрастают, достигая максимума в нижней части откосов. В то же время влияние конструктивных особенностей ядра приводит к появлению арочного эффекта и существенному изменению НДС плотины. Эти явления объясняются тем, что вследствие различий в деформируемости материа-

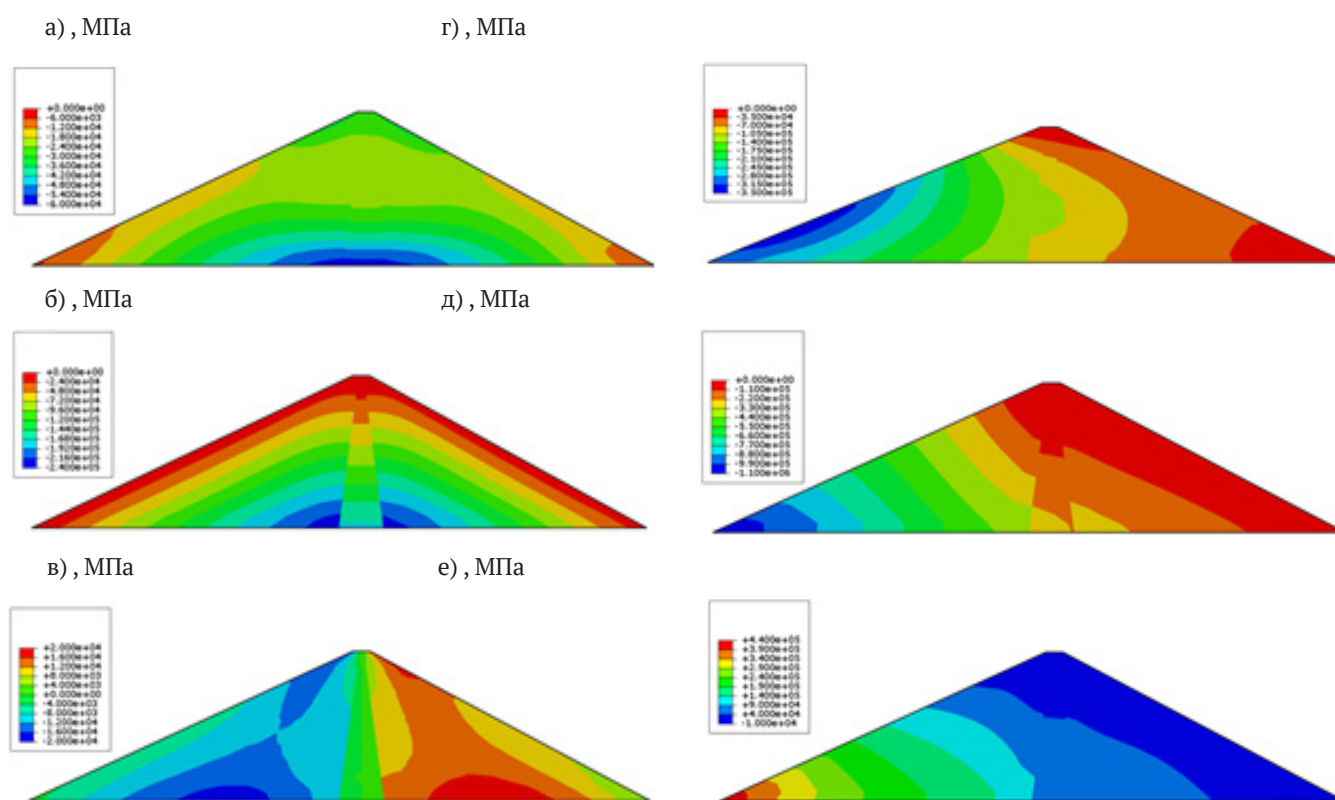


Рис. 4. Поля равных уровней горизонтальных  $\sigma_{11}$  (а, г), вертикальных  $\sigma_{22}$  (б, д) и касательных  $\sigma_{12}$  (в, е) напряжений для Гиссаракской плотины при пустом (а, б, в) и полном (г, д, е) заполнении водохранилища.

уровня. Наибольшие перемещения наблюдаются на гребне и в зоне ядра плотины. Учёт конструктивных особенностей, а именно наличие ядра из суглинка существенно влияет на значение перемещений только в зоне ядра.

Значение перемещений точек профиля Гиссаракской плотины (рис. 3. в и г) существенно зависит от уровня заполнения воды в водохранилище. С увеличением уровня воды изменяется и поле перемещений профиля плотины: когда водохранилище заполнено до половины, меняется лишь поле перемещений верхней опорной призмы, с увеличением уровня заполнения поля перемещений постепенно изменяется в ядре и далее в нижней опорной призме.

лов суглинистого ядра и упорных призм, вызванных статическими или динамическими нагрузками, наблюдается появление арочного эффекта в поперечном сечении на контакте ядра с переходными зонами и призмами. В результате этого может нарушаться монолитность плотины с вероятным образованием сквозных поперечных трещин внутри и продольных трещин на гребне ядра [20].

Сопоставление полученных результатов показывает, что при полном заполнении водохранилища влияние гидростатического давления воды полностью меняет характер распределения напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{12}$  в теле плотины и полностью теряется их симметричный характер. При этом величина напряжений  $\sigma_{11}$  увеличивается в

2–3 раза, а значение вертикальных напряжений  $\sigma_{22}$  увеличивается до 2 раз на участках, близких к откосу в верхней призме.

На втором этапе расчета с использованием результатов полученных на первом этапе для напряжений, оцениваются прочность рассматриваемой плотины в плоской постановке с использованием теории прочности Кулона – Мора. Согласно этой теории, при плоской деформации коэффициент запаса прочности «К» в каждой точке плотины определяется следующим выражением [12]:

$$K = \frac{0,5(\sigma_1 + \sigma_2) \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi}{0,5(\sigma_1 - \sigma_2)} \quad (7)$$

здесь: К - коэффициент запаса прочности в каждой точке плотины;  $\varphi$  - угол внутреннего трения грунта; с - коэффициент сцепления;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - значения главных напряжений возникающие в точках плотины.

В зависимости от значения определяемого коэффициента запаса прочности «К» в работе делаются следующие выводы:

- 1) Если  $K > 1$ , то эти точки грунтовой плотины считаются прочными.
- 2) Если  $K = 1$ , то эти точки грунтовой плотины будут находиться в пределе прочности.
- 3) Если  $K < 1$ , то прочность в этих точек плотины считается необеспеченной и на этих участках теряется устойчивость плотины.

Для оценки прочности Гиссаракской плотины под влиянием собственного веса и гидростатического давления воды при полном заполнении водохранилища с помощью выражения (7) определены значения коэффициента запаса прочности «К» во всех точках тела плотины.

Полученные результаты показывают, что значение коэффициента запаса прочности плотины (под действием статических нагрузок) на всех участках составляет  $K > 1$ , что показывает обеспеченность прочности плотины в це-

лом. Также установлено, что гидростатическое давление воды в водохранилище активно влияет на характер распределения коэффициента запаса прочности «К» в теле плотины.

#### 4. Выводы.

1. Для исследования напряжённо-деформированного состояния и оценки прочности грунтовых плотин в плоской постановке под действием статических нагрузок разработана математическая модель на основе вариационного уравнения Лагранжа. Поставленные задачи с использованием методов конечных элементов сводились к большому порядку неоднородной системы алгебраического уравнения.

2. С помощью разработанной программы расчета исследовано НДС и оценена прочность Гиссаракской плотины с использованием теории прочности Кулона – Мора под действием собственного веса и гидростатического давления воды.

#### 3. Выявлено, что:

- перемещения точек в теле плотины под действием собственного веса имеют примерно симметричный характер относительно вертикальной оси плотины. При этом перемещение точек в вертикальном направлении преобладает. Наибольшие перемещения наблюдаются на гребне и в зоне ядра плотины;

- уровень заполнения воды в водохранилище оказывает существенное влияние на напряжённо-деформированное состояние тела плотины.

4. Определение прочности грунтовых плотин с использованием теории прочности Кулона – Мора показывает, что значения коэффициента запаса прочности «К» для всех точек, рассматриваемой плотины получились  $K > 1$ . Из этого видно, что обеспечена прочность Гиссаракской плотины под действием массовых сил и гидростатического давления обеспечена.

№	Литературы	References
1	Красников Н.Д. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений из грунтовых материалов. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 240 с.	Krasnikov N.D. <i>Sejstmostojkost' gidroteh-nicheskikh sooruzhenij iz gruntovyh materialov</i> [Seismic resistance of hydraulic structures made of earth materials]. Moscow: Energoizdat, 1981, 240 p. (in Russian)
2	Ляхтер В.М., Ивашенко И.Н. Сейсмостойкость грунтовых плотин. – Москва: Наука, 1986. – 233 с.	I. I. N. Lyakhter V.M., <i>Sejstmostojkost' gruntovyh plotin</i> [Seismic resistance of earth dams]. Moscow: Nauka, 1986, 233 p. (in Russian)
3	Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. – Москва: Энергоиздат, 1983. – 256 с.	Zaretsky Yu.K., Lombardo V.N. <i>Statika i dinamika gruntovyh plotin</i> [Statics and dynamics of earth dams] Moscow: Energoizdat, 1983, 256 p. (in Russian)
4	Мирсаидов М.М. Теория и методы расчета грунтовых сооружений на прочность и сейсмостойкость. – Ташкент: «Фан», 2010. – 312 с. (Монография).	Mirsaidov M.M. <i>Teorija i metody rascheta gruntovyh sooruzhenij na prochnost' i sejstmostojkost'</i> [Theory and methods for calculating earth structures for strength and seismic resistance]. Tashkent: "Fan", 2010.- 312 p. (Monograph). (in Russian)
5	Константинов И. А. Динамика гидротехнических сооружений. Часть 2. – Ленинград.: Изд. ЛПИ, 1976. – 196 с.	Konstantinov I.A. <i>Dinamika gidro-tehnicheskikh sooruzhenij</i> [Dynamics of hydrotechnical structures] in Part 2. L.: LPI, 1976, p. 196. (in Russian)
6	Mirsaidov, M.M., Sultanov, T.Z., Sadullaev, A. Determination of the stress-strain state of earth dams with account of elastic-plastic and moist properties of soil and large strains. Magazine of Civil Engineering. 2013. 40(5), Pp. 59-68. DOI: 10.5862/MCE.40.7	Mirsaidov, M.M., Sultanov, T.Z., Sadullaev, A. Determination of the stress-strain state of earth dams with account of elastic-plastic and moist properties of soil and large strains. Magazine of Civil Engineering. 2013. 40(5), Pp. 59-68. DOI: 10.5862/MCE.40.7

7	Mirsaidov, M. An account of the foundation in assessment of earth structure dynamics. 2019. E3S Web of Conferences. 97,04015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704015	Mirsaidov, M. An account of the foundation in assessment of earth structure dynamics. 2019. E3S Web of Conferences. 97,04015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704015
8	Mirsaidov M.M., Toshmatov, E.S. Spatial stress state and dynamic characteristics of earth dams. Magazine of Civil Engineering. 2019. 89(5), Pp. 3-15. DOI: 10.18720/MCE.89.1	Mirsaidov, M.M., Toshmatov, E.S. Spatial stress state and dynamic characteristics of earth dams. Magazine of Civil Engineering. 2019.89(5),Pp.3-15.DOI: 10.18720/MCE.89.1
9	Pinyol N.M., Alonso E.E. Earth dam, spatial model, stress-strain state, dynamic characteristic, natural frequency, modes of oscillations International Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 17. No. 4. Pp. 501–513.	Pinyol N.M., Alonso E.E. Earth dam, spatial model, stress-strain state, dynamic characteristic, natural frequency, modes of oscillations International Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 17. No. 4. Pp. 501–513.
10	Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Yarashov J.A., Khujanazarova N., Urazmukhamedova, Z. Mathematical simulation and the methods to assess the strength of earth dams. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019, 2019, 9011818	Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Yarashov J.A., Khujanazarova N., Urazmukhamedova, Z. Mathematical simulation and the methods to assess the strength of earth dams. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019, 2019, 9011818
11	Mirsaidov M., Sultanov T., Yarashov J., Toshmatov E. Assessment of dynamic behaviour of earth dams taking into account large strains. E3S Web of Conferences, 2019, 97, 0501	Mirsaidov M., Sultanov T., Yarashov J., Toshmatov E. Assessment of dynamic behaviour of earth dams taking into account large strains. E3S Web of Conferences, 2019, 97, 0501
12	Urazmukhamedova, Z., Juraev, D., Mirsaidov, M. Assessment of stress state and dynamic characteristics of plane and spatial structure. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2070(1), 012156	Z. Urazmukhamedova, D. Juraev, and M. Mirsaidov, "Assessment of stress state and dynamic characteristics of plane and spatial structure," in Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 2070, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/2070/1/012156.
13	Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Yarashov J.Y. Strength of earth dams considering elastic-plastic properties of soil. Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 08. Pp. 10813. doi: 10.34910/MCE.108.13	Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Yarashov J.Y. Strength of earth dams considering elastic-plastic properties of soil. Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 08. Pp. 10813. doi: 10.34910/MCE.108.13
14	Wang M., Chen J., Xiao W. Experimental and numerical comparative study on gravity dam-reservoir coupling system KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 22. No. 10. Pp. 3980–3987.	Wang M., Chen J., Xiao W. Experimental and numerical comparative study on gravity dam-reservoir coupling system KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 22. No. 10. Pp. 3980–3987.
15	Сорока В.Б., Саинов М.П., Королев Д.В. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: опыт исследования напряженно-деформированного состояния. Вестник МГСУ "Гидравлика.Геотехника. Гидротехническое строительство". Том 14. Выпуск 2. – Москва, 2019. – С. 207–224.	Soroka V.B., Sainov M.P., Korolev D.V. <i>Kamenno-nabrosnye plotiny s zhelezobetonnyim jekranom: opyt issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostojaniya</i> [Rockfill dams with a reinforced concrete screen: experience in studying the stress-strain state]. Bulletin of MGSU "Hydraulics. Geotechnics. Hydraulic engineering". Volume 14. Issue 2 Moscow, 2019, pp. 207–224 (in Russian)
16	Trifon Germanov. Effect of the pore water pressure on the stress-strain behavior of earth dams. GEOTECH YEAR 2000, Developments in Geotechnical Engineering, 27-30 November 2000, Bangkok Thailand, Pp. 429-438.	Trifon Germanov. Effect of the pore water pressure on the stress-strain behavior of earth dams. GEOTECH YEAR 2000, Developments in Geotechnical Engineering, 27-30 November 2000, Bangkok Thailand, Pp. 429-438.
17	Hongqi Ma Fudon Chi. Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams. Engineering. Vol. 2, Iss. 4, 2016, Pp. 498-509. <a href="https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001">https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001</a> Get rights and content	Hongqi Ma Fudon Chi. Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams. Engineering. Vol. 2, Iss. 4, 2016, Pp. 498-509. <a href="https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001">https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001</a>
18	Kong X., Liu J., Zou D. Numerical simulation of the separation between concrete face slabs and cushion layer of Zipingpu dam during the Wenchuan earthquake Science China Technological Sciences. 2016. Vol. 59. No. 4. Pp. 531–539.	Kong X., Liu J., Zou D. Numerical simulation of the separation between concrete face slabs and cushion layer of Zipingpu dam during the Wenchuan earthquake Science China Technological Sciences. 2016. Vol. 59. No. 4. Pp. 531–539.
19	Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – Москва: Высшая школа, 1990. – 400 с.	Alexandrov A.V., Potapov V.D. <i>Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti</i> [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow.: Higher school, 1990. 400 p. (in Russian)
20	Тейтельбаум А.И., Мельник В.Г., Саввина В.А. Трещинообразование в ядрах и экранах каменно-земляных плотин. – Москва: Стройиздат, 1975. – 166 с.	Teitelbaum A.I., Melnik V.G., Savvina V.A. <i>Treshhinoobrazovanie v jadrakh i jekranah kamenno-zemljanyh plotin.</i> [Crack formation in the cores and screens of rock-and-earth dams]. Moscow., Stroyizdat 1975. 166 p. (in Russian)