

IRRIGATSIYA va MELIORATSIYA

№2(8). 2017



Муассис:

Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институти (ТИҚХММИ)

Манзилимиз: 100000,
Тошкент ш.,
Қори-Ниёзий, 39. ТИМИ

Бош муҳаррир:
Султонов Тохиржон
Закирович

Илмий муҳаррир:
Салоҳиддин
Абдулҳаким
Темирхўжаевич

Таҳрир ҳайъати:
проф. Ҳ.Умурзаков;
қ.х.ф.н. Ш.Ҳамраев;
т.ф.н. Х.Ишанов;
акад. Қ.Мирзажонов
проф. М.Ҳамидов;
проф. М. Бакиев;
проф. О.Рамазонов;
т.ф.д. Б.Мирзаев
проф. Ш.Рахимов;
проф. О.Арифжанов;
проф. О.Гловацкий;
проф. Р.Икрамов;
проф. Б.Серикбаев;
проф. А.Чертовичский;
проф. А.Султонов;
проф. З.Исмаилова.
т.ф.д. И.Махмудов
қ.х.ф.д. С.Исаев
А.Сулаймонов

E-mail: i_m_jurnal@tiim.uz
internet: www.tiim.uz

«Irrigatsiya va Melioratsiya»
журнали илмий-амалий,
аграр-иқтисодий соҳага
иқтисослашган. Журнал
Ўзбекистон Матбуот ва
ахборот агентлигида
2015 йил 4 мартда
0845-рақам билан
руйхатга олинган

Муҳаррир:
С.С.Ходжаев.
Дизайнер:
М.П.Ташханова;
С.С.Таджиев.

Обуна индекси: 1285

ИРРИГАЦИЯ ВА МЕЛИОРАЦИЯ

- М.Л. Арушанов, У. Х. Жумаев
Уточнение 1-го уровня модели WOFOST с использованием данных дистанционного зондирования.....5
- Т.Ш. Мажидов
Влияние изменения климата на водное хозяйство и меры адаптации.....9
- А. Рамазанов
Методы и приемы водосбережения на орошаемых землях.....12
- В.Sh. Akmalov, O. Blanpain, E. Masson
Study of Ecological Changes in Syrdarya Province by Using the Remote Sensing and GEOBIA Analysis Method.....15
- Ҳ.О. Лапасов, Х.С. Хусанбаева
Ўтлоқи бўз тупроқлар шароитида ғўзанинг ан-боёвут-2 ва пахтакор-1 навининг суғориш усуллари пахта ҳосилдорлигига таъсири.....20
- А. Ахатов, Д.А. Махкамова
Тупроқдаги гумус кислоталарининг аҳамияти.....23
- Х. Ирисов, Д. Джураев, А. Уришев
Ҳаво оқими тезлигини аниқлайдиган найчани лойиҳалаш.....25

ГИДРОТЕХНИКА ИНШОТЛАРИ ВА НАСОС СТАНЦИЯЛАР

- А.А. Янгиев, О.А. Муратов
Зомин сув омборидаги гидротехника иншоотларининг ишончли ва хавфсиз ишлаш яхшилаш бўйича тавсиялар.....29
- М.М. Мирсаидов, Т.З. Султанов, А.Н.Ишматов, Б.Ш. Юлдашев
Решение задач о нелинейных колебаниях для грунтовых плотин разложением по собственным формам колебаний.....32
- Ш.У. Юлдашев, З.Ш. Шарипов, Б.Х.Норов
Сув насослари деталларининг ишлаш шароити ва ресурсини тиклаш технологияси.....38
- Н.М. Икрамов
Грядное движение наносов в размываемых руслах.....44

ИРРИГАЦИЯ ВА МЕЛИОРАЦИЯ ИШЛАРИНИ МЕХАНИЗАЦИЯЛАШ

- А.У. Салимов, Ш.Ж. Имомов
Оптимизация процессов биогазовой установки по индивидуальному заказу.....47
- Т.С. Худойбердиев, А.Н. Худойёров, Б. Раззақов, М. Юлдашева
Интенсив боғдорчиликда кўчатлар қатор ораларига баҳорги ишлов берувчи комбинациялашган-универсал агрегатни технологик иш жараёни50
- Б.Ш.Гайбуллаев
Тяговое сопротивление корпуса плуга к овощеводческому трактору.....52

СУВ ХЎЖАЛИГИ ИҚТИСОДИ ВА ЕР РЕСУРСЛАРИДАН ФОЙДАЛАНИШ

- А.С.Чертовичский
Землепользование в системе природопользования.....55
- А.С.Чертовичский
Основные задачи землепользования.....59

УДК: 624.131.627.8.539.37

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ О НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ДЛЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН РАЗЛОЖЕНИЕМ ПО СОБСТВЕННЫМ ФОРМАМ КОЛЕБАНИЙ

*М.М. Мирсаидов - д.т.н., профессор, Т.З. Султанов - д.т.н., доцент,
А.Н. Ишматов - к.ф.-м.н., доцент, Б.Ш. Юлдошев - старший преподаватель
Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства*

Аннотация

Ушбу мақолада грунтли тўғонларнинг чизиқсиз динамик масаласини эластик ҳолатдаги хусусий тебраниш шакллари ажратиш билан ечишнинг услуби келтирилган. Шунингдек, грунтли тўғонларнинг конструктив бир жинсизлиги, грунтнинг қовушқоқ-эластик ва чизиқсиз эластиклик хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда динамик ҳолатини тадқиқ этилган натижалари келтирилган. Олиб борилган тадқиқотларнинг натижалари асосида иншоотнинг конструктив ва материалнинг чизиқсизлик хусусиятларини ҳисобга олиш билан қатор янги механик натижалар олиш имконияти аниқланган.

Abstract

This paper presents a technique for solving a nonlinear dynamical problem for earth dams by expanding the solution on their own forms of vibrations of the elastic problem. The results of studies of the dynamic behavior of earth dams are also given, taking into account the nonlinear elastic and viscoelastic properties of the soil and the inhomogeneous structural feature. The carried out researches have allowed to reveal a number of the new mechanical effects associated with taking into account nonlinear properties of a material and design features.

Аннотация

В данной работе приводится методика решения нелинейной динамической задачи для грунтовых плотин разложением решения по собственным формам колебаний упругой задачи. Приводятся также результаты исследований динамического поведения грунтовых плотин с учетом нелинейных упругих и вязкоупругих свойств грунта и неоднородной особенности конструкции. Проведенные исследования позволили выявить ряд новых механических эффектов, связанных с учетом нелинейных свойств материала и конструктивных особенностей.

Введение. В последнее время опубликованы ряд работ, где учитывается проявление упругих, вязкоупругих линейных и нелинейных, а также упруго-вязкопластических и других свойств материала грунтовых сооружений как при статических, так и при динамических воздействиях [1, 2, 4-8, 19-21].

Теоретические и экспериментальные основы проявления нелинейных реологических свойств различных грунтов приводятся в фундаментальных работах [11-13, 17, 18, 25, 28]. Несмотря на это, оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений зачастую проводится только в рамках линейной вязкоупругости, так как учет нелинейных свойств грунта является сложной задачей, решение которой требует современного развития науки и практики.

Исследована динамическая реакция грунтовых плотин [1] с учетом нелинейных и вязкоупругих свойств грунта, где установлена зависимость величины возникающих динамических реакций от нагрузки и механических свойств грунта. В работе [6] для прогноза геологических бедствий в грунтах предложена динамическая модель и получено уравнение, описывающее реологические свойства грунта при динамических воздействиях.

Динамическое поведение грунтовых плотин с учетом нелинейных свойств материала рассмотрено в [2]. Исследованы переходные динамические процессы и

эффекты ползучести при циклических воздействиях. Задачи решены методом Ньюмарка.

В работе [4] с использованием нелинейно реологических моделей исследовано напряженное состояние плотины. Возможность использования этой модели продемонстрирована сопоставлением численных результатов с результатами лабораторных испытаний.

Предложена модель [3] и набор определяющих соотношений для реологической модели мягких грунтов. Возможность использования этой модели подтверждена рядом экспериментов реологической консолидации с разной скоростью загрузки.

В работе [9] показана тенденция к увеличению мгновенного модуля деформации с увеличением ползучести. Введена модель нелинейной ползучести для мягких пород грунтов, в которых распад ползучести описывается нелинейной функцией упрочнения и коэффициентом вязкости, а кривые нелинейной ползучести хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В работе [5] исследуются свойства крупнозернистых материалов каменно-набросной плотины с использованием реологических моделей. Показано, что для моделирования деформации необходимо единое описание взаимодействия различных факторов. Полученные результаты численного моделирования сравниваются с имеющимися экспериментальными данными для

каменно-набросного материала.

В работе [26] приводится постановка и методы решения задачи о взаимодействии длинных свай с окружающим неоднородным массивом с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов на основе новой модели. Показано, что учет этих свойств грунта приводит к перераспределению во времени усилий в боковых и нижних частях свай.

Приведенный обзор известных работ показывает необходимость проведения исследований по оценке напряженно-деформированного состояния и динамического поведения грунтовых сооружений с учетом нелинейных и реологических свойств грунта.

Постановка задачи и методы решения. Рассматривается неоднородное сооружение (рис.1), состоящее из деформируемых тел объемом $V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$. Нижняя часть сооружения находится на жестком осно-

можных перемещениях равна нулю:

$$\delta A = - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV - \int_V \rho_n \ddot{u} \delta u dV + \int_V \tilde{f} \delta u dV + \int_{S_p} \tilde{p}_c \delta u dS = 0 \quad (1)$$

Здесь \vec{u} , ε_{ij} , σ_{ij} - соответственно, вектор перемещений и компоненты тензоров деформаций и напряжений; $\delta \vec{u}$, $\delta \varepsilon_{ij}$ - изохронные вариации перемещений и деформаций; ρ_n - плотность материала элементов рассматриваемой системы \tilde{f} - вектор массовых сил; \tilde{p}_c - гидростатическое давление воды.

Для описания свойств нелинейно вязкоупругого материала используется кубическая нелинейная зависимость [14]:

$$\sigma_{ij} = K_n \varepsilon_{ij} \cdot (t) \delta_{ij} + 2G_n \left\{ e_{ij}(t) - \int_0^t \Gamma_1(t-\tau) e_{ij}(\tau) d\tau \right\} + \lambda \left\{ e_{ij}(t) e(t) - \int_0^t \Gamma_3(t-\tau) e_{ij}(\tau) e(\tau) \lambda d\tau \right\} \quad (2)$$

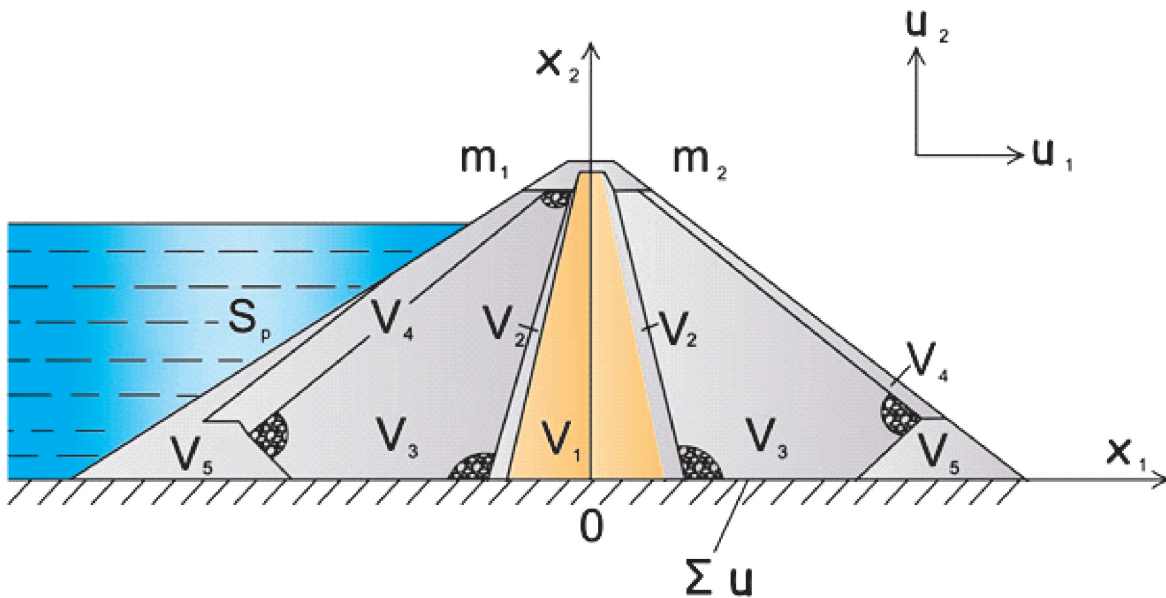


Рис.1. Неоднородное сооружение

вании Σ_u , где приложено кинематическое воздействие $\vec{u}_0(x_1, x_2, t)$. На поверхности S_p действует гидростатическое давление $\tilde{p}_c(x_1, x_2)$, а остальная часть поверхности - свободна от напряжения. Сооружение (рис.1) находится в условиях плоской деформации и представляет собой массивное тело, поэтому при расчете учитываются массовые силы \tilde{f} . Материал разных частей сооружений считается линейно вязкоупругим, нелинейно упругим или нелинейно вязкоупругим. На границах раздела областей перемещения и компоненты напряжений непрерывны.

Задача состоит в определении полей перемещений и напряжений в сооружении (рис.1), при учете массовых сил \tilde{f} , давления воды $\tilde{p}_c(x_1, x_2)$ и кинематического воздействия $\vec{u}_0(x_1, x_2, t)$ в основании Σ_u .

Для постановки задачи используется принцип возможных перемещений, согласно которому сумма работы всех активных сил, включая силы инерции, на воз-

можных перемещениях равна нулю. Зависимость (2) используется для описания линейно упругих, вязкоупругих, а также нелинейно упругих и вязких свойств материала частей системы (индекс $n=1, \dots, 5$ относится к соответствующему объёму V_n). Здесь приняты следующие обозначения: $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - (1/3)\theta \delta_{ij}$; $e = e_{kl} e_{lk}$ - первый инвариант тензора деформаций; K_n, G_n - мгновенный объемный и сдвиговой модули упругости; λ - коэффициент нелинейности; Γ_1, Γ_3 - ядра релаксации для линейной и нелинейной составляющих вязкости материала; δ_{ij} - символ Кронеккера; $\theta = \varepsilon_{ii}$ - объемная деформация; $i, j, k, l = 1, 2$.

Связь тензора деформации с компонентами вектора перемещений описывается линейными соотношениями Коши

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

Задаются также кинематические условия в основании

$$\vec{u}_0(\vec{x}, t) = \vec{v}_1(t) \quad \vec{x} \in \Sigma_u \quad (4)$$

и начальные условия при $t=0$:

$$\vec{x} \in V: \vec{u}(\vec{x},0)=\vec{u}_2(\vec{x}); \quad \dot{\vec{u}}(\vec{x},0)=\vec{u}_3(\vec{x}) \quad (5)$$

где \vec{u}_1 - заданная функция времени; \vec{u}_2, \vec{u}_3 - заданные функции координат.

При решении плоской задачи вектор перемещений имеет две компоненты $\vec{u} = \{u_1, u_2\}$ в системе координат $\vec{x} = \{x_1, x_2\}$.

Приближенное решение рассматриваемой задачи находится в виде разложения по собственным формам колебаний упругой задачи для неоднородных систем [22], т.е.:

$$\vec{u}(\vec{x},t) = \vec{u}_o(\vec{x},t) + \sum_{k=1}^N \vec{u}_k^*(\vec{x}) y_k(t); \quad \delta \vec{u} = \sum_{k=1}^N \vec{u}_k^*(\vec{x}) \delta y_k(t) \quad (6)$$

где: $\vec{u}_o(\vec{x},t)$ - известная функция (4), удовлетворяющая краевым условиям задачи; $\vec{u}_k^*(\vec{x})$ - собственные формы колебаний упругой задачи для неоднородного сооружения; $y_k(t)$ - искомые функции времени; $\delta y_k(t)$ - произвольные константы; N - количество собственных форм, удерживаемых в разложении (6).

При использовании данного подхода основная трудность состоит в выборе координатных функций $\vec{u}_k^*(\vec{x})$, которые достаточно просты в случае тел простой формы и условий закрепления. Для тел сложной формы выбор координатных функций $\vec{u}_k^*(\vec{x})$, сводящих исходную систему к системе с конечным числом степеней свободы, представляет трудную задачу. Использование же собственных форм колебаний позволяет точно описать реальную геометрию и различные воздействия. Именно этим объясняется выбор в качестве координатных функций собственных форм колебаний. Поэтому в данной работе сначала с учетом всех факторов методом конечных элементов (МКЭ) определяются собственные формы колебаний неоднородной линейно упругого сооружения (рис.1). Далее решение задачи о вынужденных колебаниях системы с учетом нелинейных вязкоупругих свойств материала строится в виде разложения по найденным собственным формам колебаний.

Задача о неустановившихся вынужденных колебаниях нелинейного неоднородного вязкоупругого сооружения (рис.1) после постановки (6) в (1) сводится к решению системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений [19]:

$$M_{ij} \ddot{y}_j(t) + K_{ij} y_j(t) - C_{ij} \int_0^t \Gamma_1(t-\tau) y_j(\tau) d\tau = F_i + Q_i f(t) - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N L_{ijkm} y_j(t) y_k(t) y_m(t) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N H_{ijkm} \int_0^t \Gamma_3(t-\tau) y_j(\tau) y_k(\tau) y_m(\tau) d\tau \quad (7)$$

с начальными условиями:

$$y_i(0) = y_{oi}; \quad \dot{y}_i(0) = \dot{y}_{oi}; \quad i, j, k, m = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Порядок уравнений (7) равен N - количеству удержанных собственных форм колебаний упругого неоднородного сооружения в разложении (6). Коэффициенты, $Q_i, F_i, M_{ij}, K_{ij}, C_{ij}, L_{ijkm}, H_{ijkm}$ системы нелинейных интегро- дифференциальных уравнений (7) определяются через собственные формы колебаний $\vec{u}_k^*(\vec{x})$ путем интегрирования их по объему рассматриваемого неоднородного сооружения (рис.1). Здесь F_i - суммарная

внешняя нагрузка от массовых сил и гидростатического давления, $f(t)$ - функция, представляющая кинематическое воздействие.

При учете только линейных вязкоупругих свойств материала система (7) превращается в линейную систему интегро-дифференциальных уравнений, которая при начальных условиях (8) решается методом, изложенным в [23]. При учете нелинейно вязкоупругих свойств материала система нелинейных уравнений (7) при начальных условиях (8) решается методом замораживания [15,27].

Тестовый пример. Для проверки достоверности разработанного алгоритма и программы на ЭВМ было решено интегро-дифференциальное уравнение

$$\ddot{y} + \omega^2 \left[y - \int_0^t \Gamma(t-\tau) y(\tau) d\tau \right] + \rho \omega^2 \left[y^3 - \int_0^t \Gamma_1(t-\tau) y^3(\tau) d\tau \right] = f(t) \quad (9)$$

при начальных условиях

$$\text{и исходных данных} \quad y(0)=1, \dot{y}(0)=-\beta \quad (10)$$

$$\Gamma(t) = Ae^{-\beta t} \cdot t^{\alpha-1}, \quad \Gamma_1(t) = Ae^{-2\beta t} \cdot t^{\alpha-1};$$

$$f(t) = \left[\beta^2 + \omega^2 - \frac{A\omega^2 t^\alpha}{\alpha} + \rho\omega^2 e^{-2\beta t} \left(1 - \frac{At^\alpha}{\alpha} \right) \right] e^{-\beta t} \quad (11)$$

$$\beta=0.05; \quad \alpha=0.25; \quad \omega=2; \quad A=0.01; \quad \rho=0.01.$$

Уравнение (9) при (10) и (11) имеет точное решение [10]: $y(t) = e^{-\beta t}$.

В табл.1 приведено сравнение точного решения $y(t) = e^{-\beta t}$ с решением, полученным по разработанной

Таблица 1

Время – t , сек	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,00	2,25
Точное решение	1,0	0,9669	0,9763	0,9673	0,9511	0,9387	0,9277	0,9167	0,9048	0,8928
Полученное решение	1,0	0,9875	0,9753	0,9632	0,9512	0,9394	0,9277	0,9162	0,9048	0,8936

Сравнение полученных результатов подтверждает их высокую точность. программе.

Результаты исследований.

Исследовалось динамическое поведение и напряженно-деформированное состояние нескольких грунтовых плотин [7,8,16,19-21] высотой от 70 м до 296 м с учетом их реальной геометрии и неоднородной особенности конструкции.

При этом для различных участков плотины учитывались различные механические характеристики грунта, а для описания вязкоупругих свойств грунта использовались трехпараметрические ядра релаксации А.Р. Ржаницына [24] с параметрами ядра, приведенными в [20].

Собственные колебания.

С помощью разработанного алгоритма и программы расчета на ЭВМ для рассмотренных плотин определялись собственные частоты и формы колебаний в упругой постановке. Например, для Нурекской грунтовой плоти-

ны (высотой 296 м), полученные первые собственные частоты колебаний имеют следующие значения: $\omega_1=0.8087$ Гц; $\omega_2=1.2405$ Гц; $\omega_3=1.4639$ Гц; $\omega_4=1.6617$ Гц; $\omega_5=1.7876$ Гц; $\omega_6=1.8876$ Гц; $\omega_7=1.1815$ Гц; $\omega_8=2.2482$ Гц; $\omega_9=2.4740$ Гц; $\omega_{10}=2.5392$ Гц. На рис.2 приведены только третья (рис.2а) и четвертая (рис.2б) собственные формы колебаний

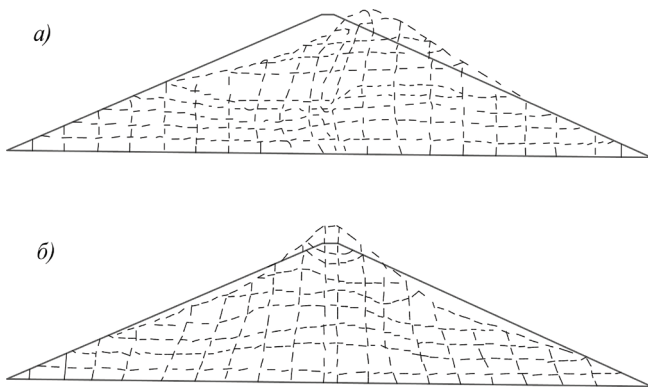


Рис.2. Собственные формы колебаний

для этой плотины, показывающие преобладание вертикально-сдвиговых деформаций сечения, проявляющихся и в других высших формах колебаний сооружения.

Неустановившиеся вынужденные колебания.

Исследовалось динамическое поведение модели Нурекской грунтовой плотины с учетом неоднородных особенностей конструкции и физически нелинейного деформирования грунта при следующих кинематических воздействиях: кратковременный и продолжительный прямоугольные импульсы, гармоническое и синусоидально-затухающее воздействие, реальная запись акселерограммы Газлийского землетрясения [29]. При этом начальные условия задачи были приняты однородными.

Исследовалась сходимость решения, как по перемещениям, так и по напряжениям для различных точек плотины при удержании в разложении (6) различного числа – N собственных форм колебаний. Исследования показали, что при решении практических задач необходимая точность по перемещениям достигается при удержании в разложении не менее шести, а по напряжениям не менее девяти собственных форм колебаний.

Динамическое поведение и напряженно-деформированное состояние этой плотины с учетом нелинейных вязкоупругих свойств грунта с коэффициентом нелинейности исследовалось при различной продолжительности нестационарных кинематических воздействий ускорения в виде

$$\ddot{x} \in \sum_0 : \ddot{u}_{i_0}(t) = \ddot{u}_{2_0}(t) = B \sin pt, \quad 0 < t \leq t^* \quad (12)$$

а). При кратковременном воздействии (12) продолжительностью $t^* = 0,1$ сек колебания сооружения, носят затухающий характер. При этом максимальные амплитуды нормальных напряжений достигаются в нижней части ядра, где вертикальные напряжения больше го-

ризонтальных, на определенных участках верховых и низовых откосов, а также в пригребневой зоне, где горизонтальные напряжения превышают вертикальные.

Большие касательные напряжения возникают на верхней части ядра, а также в центральных зонах верхового и низового откосов.

б). При продолжительном воздействии (12) с параметрами $B = 0.25$ и $p = 0.64$ Гц и периодом $t^* = 4$ сек на рис.3 показано изменение вертикального переме-

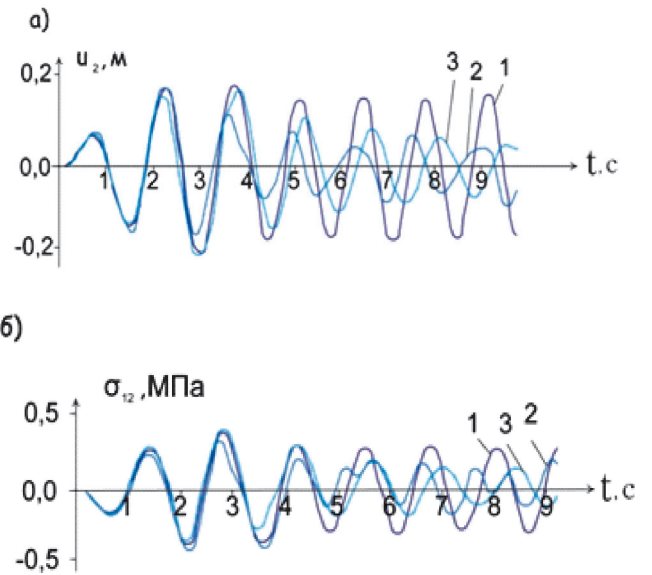


Рис.3. Изменение вертикального перемещения (а) и касательного напряжения (б) по времени в точке плотины

щения - u_2 и касательного напряжения σ_{12} для точки плотины ($x_1=140,2$ м; $x_2=29,6$ м), где обозначены: 1- _____ линейно-упругое, 2- ---- нелинейно-упругое, 3- нелинейно-вязкоупругое решения.

Анализ результатов указывает на заметное снижение амплитуды перемещений точек плотины при учете нелинейности по сравнению с линейной задачей. Влияние вязкости материала в начальный момент приводит к незначительному затуханию колебаний по времени. После снятия нагрузки и линейные и нелинейные колебания имеют почти гармонический характер с заметным различием амплитуд. Для нелинейно-вязкоупругого случая характерно постепенное затухание колебаний во времени.

Касательные напряжения в отдельных точках сооружения в линейно-упругом случае несколько превышают нелинейно-упругие, а учет нелинейно-вязкоупругих свойств материала снижает эти напряжения по сравнению с линейно и нелинейно - упругими случаями.

На рис.4 показано изменение горизонтального перемещения - u_1 точки плотины ($x_1=140,2$ м; $x_2=29,6$ м) и нормального напряжения σ_{11} в точке плотины ($x_1=-476,2$ м; $x_2=59,2$ м) при резонансном режиме воздействия (12) с параметрами $B = 0,2$ и $p=1,24$ Гц ($p \approx \omega_2$).

В резонансном режиме вынужденные колебания плотины происходят с линейно возрастающим размахом. Учет нелинейной зависимости ($\sigma \sim \epsilon$) между напря-

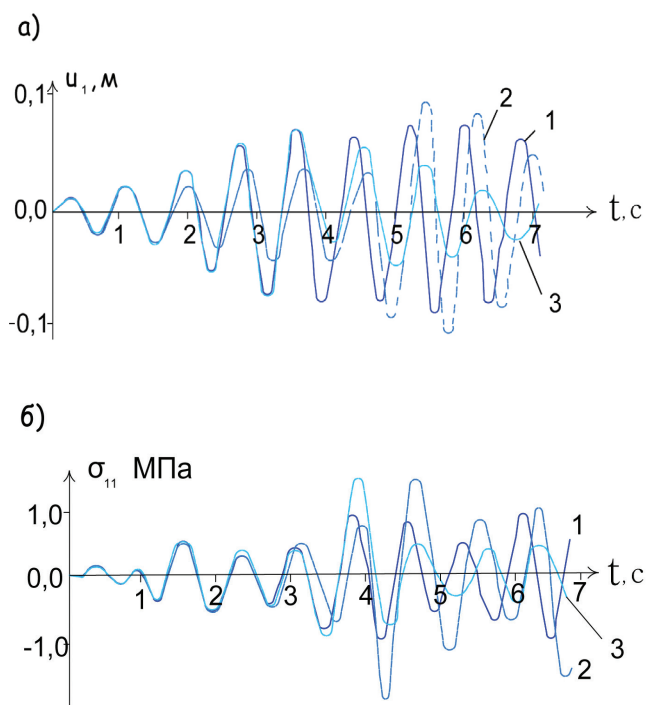


Рис.4.Изменение горизонтального перемещения (а) и нормального напряжения (б) по времени в точках плотины

жением и деформацией либо уменьшает, либо увеличивает амплитуду колебаний при различной (жесткой или мягкой, т.е. $\pm \lambda$) диаграмме σ - ϵ для грунта. Максимальные напряжения в различных точках плотины возникают через некоторый промежуток времени после прекращения действия импульса и далее напряжения постепенно убывают, за счет вязкости.

Исследовано напряженно - деформированное состояние Гиссаракской грутовой плотины (высотой 138.5 м) при высокочастотном сейсмическом воздействии (акселерограмма Газлийского землетрясения [29]) с учетом неоднородной особенности конструкции (материал призмы плотины – линейно-упругий, ядра – нелинейно-вязкоупругий). Результаты показали, что при высокочастотном интенсивном воздействии характер колебаний сооружений, обладающих низкочастотным спектром, имеет три выраженных этапа: начальный (примерно до 2 сек); - с малыми амплитудами, переходный этап (примерно до 6 сек), когда происходит раскачка сооружения и этап свободных колебаний с достигнутой амплитудой и частотой собственных колебаний. При этом высокочастотный характер воздействия не позволяет в полной мере выявить нелинейные деформации и, несмотря на высокую интенсивность воздействия, вызывающего большие напряжения в теле рассматриваемых плотин, учет нелинейного деформирования материала не сильно искажает картину упругого расчета.

Исследования напряженно-деформированного состояния плотин показали значительное превышение вертикальных напряжений в статическом и динамическом режимах над горизонтальными, а учет нелиней-

ного деформирования материалов приводит к уменьшению интенсивности σ_i и увеличению касательных σ_{12} напряжений в сечении плотины. При этом в ядре плотины увеличивается арочный эффект, проявляемый в упругой постановке.

В динамическом режиме на напряженно-деформированное состояние нелинейно неоднородных сооружений в значительной мере оказывают влияние не только максимальные значения ускорений, но в большей степени - его частотный спектр и продолжительность. При этом учет нелинейного деформирования увеличивает период колебаний сооружения и усиливает арочный эффект в зоне ядра, характерный для вертикальных напряжений при различных деформационных свойствах грунтов ядра и призм.

Выводы.

Проведенные исследования динамического поведения и напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с учетом нелинейно упругих, вязкоупругих свойств материала и конструктивных особенностей сооружения позволили сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель и методика решения нелинейных динамических задач для грунтовых плотин с использованием разложения решения по собственным формам колебаний с учетом нелинейно упругих и вязкоупругих свойств грунта и конструктивных особенностей сооружения.

2. Достоверность и точность методики проверена решением тестовых задач, имеющих точное решение.

3. Определены собственные частоты и форма колебаний грунтовых плотин с учетом конструктивных особенностей сооружения в упругой постановке.

4. Исследованы нелинейные вынужденные неустановившиеся колебания грунтовых плотин с учетом конструктивных особенностей сооружения и нелинейно вязкоупругих свойств материала.

5. Установлено, что:

максимальные значения нормальных и касательных напряжений при кратковременном кинематическом воздействии достигаются в разных точках плотины: вертикальные - у основания, горизонтальные - на откосных зонах, касательные - в верхней части ядра;

учет нелинейно-упругих свойств материала приводит к уменьшению, а нелинейно-вязкоупругих свойств - к увеличению периода колебаний плотины, и заметному изменению напряжений. Вязкоупругие свойства грунта способствуют постепенному затуханию колебаний;

на напряженно-деформированное состояние сооружения в значительной мере оказывает влияние не только интенсивность воздействия, но, в большей степени - его частотный спектр и продолжительность;

учет неоднородности конструкции и различие деформационных свойств грунтов ядра и призм приводит к усилению арочного эффекта в зоне ядра, характерного для вертикальных напряжений;

при сильных землетрясениях (Газли [29], $a_{max} = 1,3g$) в большинстве зон грунтовых плотин возникают растягивающие динамические напряжения.

Список использованной литературы:

1. Bao-Lin Xiong, Xi-Liang Wang and Chun-Jiao Lu. Dynamic Reaction Analysis of Tailing Dams Under Earthquake. *Advances in Environmental Geotechnics*. 2010, 6, Pp. 697-701.
2. Bilge Siyahi and HaydarArslan. Nonlinear dynamic finite element simulation of Alibey earth dam. *Environmental Geology*. Volume 54, Number 1 (2008), Pp. 77-85.
3. Bo-ning Ma, Xin-yu Xie, Kai-fuLiu .Rheological catastrophic model for soft clays *Journal of Central South University*. August 2012, Volume 19, Issue 8, Pp. 2316-2322.
4. E. Bauer, Z.Z. Fu and S. Liu. Constitutive modeling of materials for Rockfill dams. 6TH International conference on dam engineering, Lisbon, Portugal, February 15-17, 2011, Pp.1-14.
5. Erich Bauer, Zhongzhi Fu, Sihong Liu. Influence of pressure and density on the rheological properties of rockfills. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. March 2012, Volume 6, Issue 1 Pp. 25-34.
6. Hua Hu, HengxingGu and Dengrong Yu. The Research on Dynamic Rheological Mechanical. Response and Rheological Dynamic Model of Geological Disaster of Soft Rock-Soil. *Geotechnical. Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation* . 2008, Part 4, Pp. 359-366.
7. Mirsaidov M. M., Sultanov T. Z. Theory and Methods of Strength Assessment of Earth Dams. Lambert Akademik Publishing. Saarbrücken/ Deutschland / Germany/ 2015. 341 p.
8. Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Khodzaev D.A. Stability evaluation of slopes of earth dams with account of soil rheological properties. *Journal: Magazine of Civil Engineering*. S-Peterburg. 2012. №9, Pp.49-58.
9. Yan-lin Zhao, Ping Cao, Wei-jun Wang, Wen Wan, Ye-ke Liu. Viscoelasto-plastic rheological experiment under circular increment step load and unload and nonlinear creep model of soft rocks. *Journal of Central South University of Technology*. June 2009, Volume 16, Issue 3, Pp. 488-494.
10. Бадалов Ф.Б. Методы решения интегральных и интегродифференциальных уравнений наследственной теории вязкоупругости. -Ташкент: Мехнат, 1987.- 269 с.
11. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
12. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений.- М.: Стройиздат, 1988, 552 с.
13. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. М.: Энергоиздат, 1983. 256 с.
14. Ильюшин А.А., Победра Б.Е. Основы математической теории термо-вязкоупругости. -М.: Наука, 1970. - 280 с.
15. Ишматов А.Н., Мирsaidов М.М. Нелинейные колебания осесимметричного тела при нестационарных воздействиях. //Прикладная механика.- 1991. -27, №4.- С.68-74.
16. Красников Н.Д. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений из грунтовых материалов. М.: Энергоиздат, 1981. 240 с.
17. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. - М.: Недра, 1985, - 342 с.
18. Месчан С.Р. Экспериментальные основы реологии глинистых грунтов. Ер.: Гитутюн, 2008, -807 с.
19. Мирsaidов М.М. Теория и методы расчета грунтовых сооружений на прочность и сейсмостойкость. Ташкент: Фан, 2010.-312 с.
20. Мирsaidов М.М., Султанов Т.З. Использование линейной наследственной теории в вязкоупругости при динамическом расчете грунтовых сооружений. *Журнал: Основание, фундаменты и механика грунтов*. М.: 2012. № 6. С. 30-34.
21. Мирsaidов М.М., Султанов Т.З., Ходжаев Д.А. Моделирование динамических процессов в неоднородных вязкоупругих системах // *Международный научно-теоретический журнал «Электронное моделирование»* - Киев. 2012. Том 34. - № 6. -С. 41-54.
22. Мирsaidов М.М., Трояновский Е.И. Динамика неоднородных систем с учетом внутренней диссипации и волнового уноса энергии. Ташкент: Фан, 1990.- 108 с.
23. Мирsaidов М.М., Трояновский И.Е., Балакиров А. Об одном способе решения задачи Коши для системы интегродифференциальных уравнений // *Изв. АН РУз. Сер. техн. наук.* –Ташкент: 1985. №6, – С.32-36.
24. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968.- 416 с.
25. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: Изд. АСВ, 2009, 552 с.
26. Тер-Мартirosян З.Г., НгуенЗанг Нам. Взаимодействие свай большой длины с неоднородным массивом с учетом нелинейных и реологических свойств грунта. *Вестник МГСУ*. М.: 2008, №2. С. 4-14.
27. Филатов А.Н. Асимптотические методы и теория дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений. Ташкент. Фан, 1974.- 216 с.
28. Ширинкулов Т.Ш., Зарецкий Ю.К. Ползучесть и консолидация грунтов. Ташкент: Фан, 1986. 302 с.
29. Штейнберг В.В., Плетнев К.Т., Грайзер В.М. Акселерограммы колебаний грунта при разрушительном Газлийском землетрясении 17 мая 1976 г. // *Сейсмостойкое строительство*. М.- 1977. №1.- С.45-61.