

7. **Yanshin B.I.** Gidrodinamicheskie ha-racteristici zatvorov i elementov truboprovodov. Confuzory, diffuzory i zatvory: ucheb-nik. – M.: Mashinostroenie, 1965. – 257 s.

8. **Snezhko V.L., Paliivets M.S.** Kine-maticheskaya structura potoka i gidravliches-kie soprotivleniya uzla «reguliruemaya zad-vizhka-trojnik» v napornom vodovode // Pri-rodoobustrojstvo. – 2010. – No. 2. – S. 54-59.

9. GOST R ISO 5725-6-2002. Tochnost (pravilnost i pretsizionnost) metodov i resulta-tov izmerenij. Ispolzovanie znachenij tochnos-ti in praktike. – Vved. 2002-04-23. – M.: Izd-vo standartov, 2002. – 43 s.

10. **Shkulanov E.I., Khrapkovsky V.A.** Gidravlichesky raschet propusknnoj sposobnos-ti sooruzhenij s gorizontalnymi trubami // Pri-rodoobustrojstvo. – 2008. – No. 4. – S. 69-74.

11. **RozaNov N.P.** Gidravlichesky rasche-ty vodoprovodyashchih trub: uch. posobie. – M.: MGMI, 1979.

The material was received at the editorial office
03.07.2020

Information about the author

Paliivets Maxim Sergeevich, candida-te of technical sciences, associate professor of the department «Information technologies in AIS», Federal state budgetary education-al institution of higher education «Russian State Agrarian University – Moscow Agri-cultural Academy named after C.A. Timiryazev », Moscow, Russian Federation: 127550, Moscow B. Akademicheskaya St., 44; e-mail: maxim6663@mail.ru

УДК 502/504: 627.82:532.59

DOI 10.26897/1997-6011-2020-3-78-85

В.Я. ЖАРНИЦКИЙ¹, Е.В. АНДРЕЕВ¹, С.В. КОВАЛЬ²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное автономное учреждение высшего образования

«Российский университет транспорта МИИТ» г. Москва, Российская Федерация

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРУНТОВУЮ ПЛОТИНУ

В связи с возрастающим количеством бесхозных гидротехнических сооружений, находящихся в неудовлетворительном эксплуатационном состоянии на территории России и стран СНГ, ежегодно увеличивается вероятность угрозы техногенного характера на территориях, прилегающих к ГТС. В этой связи актуальными становятся задачи по совершенствованию и разработке мероприятий по предотвращению аварий и анализу деградационной активности существующих гидротехнических сооружений данного класса. В последние годы возросли угрозы террористического характера в отношении критически важных объектов водохозяйственного назначения. Ввиду отсутствия охранных мероприятий и предварительной оценки потенциального ущерба от разрушения гидротехнических сооружений они попадают в категорию объектов повышенной опасности. Основной задачей данных исследований является разработка метода расчётного обоснования устойчивости грунтовой плотины в условиях динамического воздействия. В результате исследования был произведён расчёт кинематических параметров и напряжённо-деформированного состояния фрагмента грунтовой плотины с использованием программного комплекса, разработанного для выполнения пространственных расчётов сложных систем «плотина-основание» с учётом реальной работы грунтов и конструкции плотины. Рассматриваются разные варианты нагружения фрагмента грунтовой плотины статическими и динамическими нагрузками.

Гидротехническое сооружение, разрушение гидротехнического сооружения, динамическое воздействие, протяжённые сооружения, оценка воздействия, прогнозирование воздействия, напорные элементы плотин, риск разрушения.

Введение. Анализ аварий и поврежде-ний гидротехнических сооружений по-казывает, что механизм их возникновения

не поддаётся приемлемому уровню досто-верности. Одной из причин возникнове-ния таких аварий и катастроф могут быть

террористические акты, направленные на разрушение гидротехнических сооружений и их отдельные элементы, такие как экраны и крепления откосов гидротехнических сооружений, водосбросы и гребни плотин, одновременно являющиеся дорогой. Поэтому в условиях возрастающего риска увеличения воздействий на гидротехнические сооружения техногенного характера информация о степени повреждения или разрушения является важным условием для обеспечения эксплуатационной надёжности гидротехнических сооружений. **Опыт эксплуатации грунтовых плотин и их отдельных элементов.** В результате эксплуатации грунтовых плотин и их отдельных элементов становится понятно, что показатель надёжности является одним из необходимых условий для обеспечения эксплуатационной безопасности, но в тоже время не является достаточным и единственным условием для её обеспечения [1, 2, 3, 4].

При проектировании гидротехнических сооружений учитываются такие экстремальные природные явления, как ветровые и снеговые нагрузки, землетрясения и ураганы и т.д. При этом нельзя забывать о видах воздействий на гидротехнические сооружения, которые обусловлены повседневной деятельностью человека. К ним можно отнести падение летательных аппаратов на тело плотины или её отдельные элементы, воздействие ударной воздушной волны, образовавшейся в результате взрыва как на гребне или откосах плотины, так и в непосредственной близости от неё, а также подводные взрывы.

Считается, что для каждого водохозяйственного объекта существует вероятность возникновения аварийных воздействий и их различных сочетаний. В результате проведённого анализа по данному направлению [1, 2, 3, 4] выявлено, что к основным причинам разрушений гидротехнических сооружений в результате таких воздействий могут быть отнесены следующие:

- увеличение отказов в результате усложнения технических систем, к которым требуется регламентированный подход;
- несоблюдение современных требований безопасности при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, что способствует увеличению количества аварий на таких сооружениях;
- влияние нагрузок особого динамического характера;
- неэффективные современные методы реагирования на ЧС, суть которых сведена

к устранению последствий аварий и катастроф, а не к предупреждению таких явлений применительно к гидротехническим объектам 4-го класса.

Всё вышесказанное и явилось определяющим в наших исследованиях при разработке метода расчетного обоснования устойчивости грунтовой плотины в условиях динамического воздействия.

Материалы и методы исследований.

Для достижения поставленной задачи использован алгоритм численной реализации пространственной неупругой задачи с помощью метода конечных разностей и конечных элементов (Мак-Кормака 2-го порядка для явных динамических задач и метод конечных элементов для неявных динамических и статических задач) в Лагранжевой постановке с применением модели бетона и грунта, которая описывается для сдвига с учетом скорости загрузки плотины [5, 6, 7, 8, 9].

Основные соотношения методики упругопластического расчёта системы «плотина-основание»:

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + F_x \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + F_y, \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность рассматриваемой среды; F – массовые силы.

За «+» принято сжатие: $\frac{du}{dt} = -\left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} + \dots\right)$.

Тензор напряжения

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

Соотношения Коши

$$\frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \frac{\partial \varepsilon_{yy}}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial t} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial t} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial \varepsilon_{zy}}{\partial t} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Сокращенно

$$\rho \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \quad (4)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[\begin{aligned} &(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \\ &+(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + \\ &+(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 \end{aligned} \right] + \sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2 \quad (5)$$

второй инвариант дивергатора тензора напряжений.

Соотношения между напряжениями и деформациями в упругости (Закон Гука). Если $J_2 < F$, $l^0 \theta$ – упругость.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E(\varepsilon_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)); \\ \sigma_2 &= E(\varepsilon_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)); \\ \sigma_3 &= E(\varepsilon_3 - \mu(\sigma_2 + \sigma_1)). \end{aligned} \quad (6)$$

Соотношения между напряжениями и деформациями при наступлении пластических деформаций:

Условие пластичности для $l > 0$

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = J_2; \quad J_2 = F(\sigma) \quad (7)$$

Уравнение состояния

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = g(\sigma - f(\varepsilon)) + \begin{cases} \frac{1}{E(\varepsilon)} \frac{\partial \sigma}{\partial t}; \frac{\partial \sigma}{\partial t} \geq 0 \\ \frac{1}{E_*(\sigma, \varepsilon)} \frac{\partial \sigma}{\partial t}; \frac{\partial \sigma}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Закон деформирования при сдвиге

$$\frac{d\tilde{S}_{ij}}{dt} + \lambda_0 S_{ij} = 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\varepsilon} \right) \quad (9)$$

Согласно теории пластического течения Прандтля–Рейса, в левой части выражения – производная Яуманна $\frac{d\tilde{S}_{ij}}{dt}$.

Компоненты сдвига:

$$\left(\left[2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\varepsilon} \right) = \frac{dS_{ij}}{dt} + \lambda S_{ij} \right] \cdot S_{ij} \right) \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{2GW - F'(\sigma) \cdot \frac{d\sigma}{dt}}{2F}$$

- для изотропного упрочнения

$$\dot{\lambda} = \frac{\xi_{ij} \cdot \dot{\sigma}_{ij} - bF\dot{\sigma}}{F^2 \varphi' \left(\varepsilon_{eqv}^p \right)}$$

- для трансляционного (кинематического) упрочнения

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}; \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma; \quad J_2 - \text{второй инвариант.} \quad (11)$$

$$W = S_{ij} \cdot \dot{\varepsilon}_{ij} = (\sigma_{ij} - \sigma) \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}. \quad (12)$$

$$\begin{aligned} W &= S_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} = S_{11} (\dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{12} + \dot{\varepsilon}_{13}) + \\ &+ S_{22} (\dot{\varepsilon}_{21} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{23}) + \\ &+ S_{33} (\dot{\varepsilon}_{31} + \dot{\varepsilon}_{32} + \dot{\varepsilon}_{33}) + S_{12} (\dot{\varepsilon}_{12} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{32}) + \\ &+ S_{13} (\dot{\varepsilon}_{13} + \dot{\varepsilon}_{23} + \dot{\varepsilon}_{33}) + S_{23} (\dot{\varepsilon}_{23} + \dot{\varepsilon}_{13} + \dot{\varepsilon}_{33}) + \\ &+ S_{21} (\dot{\varepsilon}_{21} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{23}) + S_{31} (\dot{\varepsilon}_{31} + \dot{\varepsilon}_{32} + \dot{\varepsilon}_{33}) + \\ &+ S_{32} (\dot{\varepsilon}_{32} + \dot{\varepsilon}_{31} + \dot{\varepsilon}_{33}). \end{aligned}$$

$$\frac{dS_{12}}{dt} = \frac{2Gd\varepsilon_{12}}{dt} + \lambda S_{12};$$

$$\frac{dS_{13}}{dt} = \frac{2Gd\varepsilon_{13}}{dt} + \lambda S_{13};$$

$$\frac{dS_{23}}{dt} = \frac{2Gd\varepsilon_{23}}{dt} + \lambda S_{23}$$

(для S_{21}, S_{31}, S_{32} – симметрично).

Выражение для производной Яуманна $\frac{d\tilde{S}_{ij}}{dt}$:

$$\begin{aligned} 2\omega_{ij} &= \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \\ \frac{d\tilde{S}_{ij}}{dt} &= \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik} \end{aligned} \quad (13)$$

$$S_{ik} \omega_{jk} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{21} & \omega_{31} \\ \omega_{12} & \omega_{22} & \omega_{32} \\ \omega_{13} & \omega_{23} & \omega_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}\omega_{11} + S_{12}\omega_{12} + S_{13}\omega_{13} & S_{11}\omega_{21} + S_{12}\omega_{22} + S_{13}\omega_{23} & S_{11}\omega_{31} + S_{12}\omega_{32} + S_{13}\omega_{33} \\ S_{21}\omega_{11} + S_{22}\omega_{12} + S_{23}\omega_{13} & S_{21}\omega_{21} + S_{22}\omega_{22} + S_{23}\omega_{23} & S_{21}\omega_{31} + S_{22}\omega_{32} + S_{23}\omega_{33} \\ S_{31}\omega_{11} + S_{32}\omega_{12} + S_{33}\omega_{13} & S_{31}\omega_{21} + S_{32}\omega_{22} + S_{33}\omega_{23} & S_{31}\omega_{31} + S_{32}\omega_{32} + S_{33}\omega_{33} \end{pmatrix}$$

Данные вычисления производятся по принципу двухшаговой схемы Мак-Кормака. В данной схеме определение временного ряда производится в несколько приёмов, т.е. определяется показатель на предикторе с последующей коррекцией [10, 11]. В частности, для рассматриваемой выше системы (1) предиктор схемы Мак-Кормака принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ijk}^{(1)} = & \bar{u}_{ijk}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} A \left[\begin{array}{l} (1 - \varepsilon_x) \bar{u}_{i+1,j,k}^n - \\ - (1 - 2\varepsilon_x) \bar{u}_{ijk}^n - \varepsilon_x \bar{u}_{i-1,j,k}^n \end{array} \right] + \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta y} B \left[(1 - \varepsilon_y) \bar{u}_{i,j+1,k}^n - (1 - 2\varepsilon_y) \bar{u}_{ijk}^n - \varepsilon_y \bar{u}_{i,j-1,k}^n \right] + \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta y} \tilde{N} \left[(1 - \varepsilon_z) \bar{u}_{i,j,k+1}^n - (1 - 2\varepsilon_z) \bar{u}_{ijk}^n - \varepsilon_z \bar{u}_{i,j,k-1}^n \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом корректор выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ijk}^{n+1} = & \left\{ \bar{u}_{ijk}^n + \bar{u}_{ijk}^{(1)} + \frac{\Delta t}{\Delta x} A \left[\begin{array}{l} (1 - \varepsilon_x) \bar{u}_{i+1,j,k}^n - \\ - (1 - 2\varepsilon_x) \bar{u}_{ijk}^n - \\ - \varepsilon_x \bar{u}_{i-1,j,k}^{(1)} \end{array} \right] + \right. \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta y} B \left[\begin{array}{l} (1 - \varepsilon_y) \bar{u}_{i,j+1,k}^{(1)} - (1 - 2\varepsilon_y) \bar{u}_{ijk}^{(1)} - \\ - \varepsilon_y \bar{u}_{i,j-1,k}^{(1)} \end{array} \right] + \\ & \left. + \frac{\Delta t}{\Delta y} \tilde{N} \left[\begin{array}{l} (1 - \varepsilon_z) \bar{u}_{i,j,k+1}^{(1)} - (1 - 2\varepsilon_z) \bar{u}_{ijk}^{(1)} - \\ - \varepsilon_z \bar{u}_{i,j,k-1}^{(1)} \end{array} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

В векторных уравнениях:

$$\varepsilon_x = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix}; \quad \varepsilon_y = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix}; \quad \varepsilon_z = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix}.$$

Для корректного определения показателей на границах областей грунтовых сред применимы соотношения, характеризующие объёмное сжатие рассматриваемых грунтов, показатели которых можно проконтролировать и скорректировать экстраполяционными схемами.

Результаты исследований. Модель деформирования грунтовой среды.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = g(\sigma - f(\varepsilon)) + \begin{cases} \frac{1}{E(\varepsilon)} \frac{\partial \sigma}{\partial t}; \frac{\partial \sigma}{\partial t} \geq 0 \\ \frac{1}{E_*(\sigma, \varepsilon)} \frac{\partial \sigma}{\partial t}; \frac{\partial \sigma}{\partial t} < 0 \end{cases}$$

где $E_*(\sigma, \varepsilon)$ – функция, описывающая изменение показателей среды в случае разгрузки; $f(\varepsilon)$ – статическая диаграмма сжатия, аппроксимируемая функцией $f(\varepsilon) = k(\varepsilon + m_2 \varepsilon^{v_2})$; $\varphi(\varepsilon)$ – динамическая диаграмма сжатия $\varphi(\varepsilon) = E_0(\varepsilon + m_1 \varepsilon^{v_1})$;

$E_0 = \rho_0 C_0^2$ – мгновенный модуль упругости; $E(\varepsilon)$ – текущий модуль нагружения

$$E(\varepsilon) = \frac{\partial \varphi(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = E_0(1 + m_1 v_1 \varepsilon^{(v_1-1)});$$

$E_*(\sigma, \varepsilon)$ – модуль разгрузки

$$E_*(\sigma, \varepsilon) = \begin{cases} E_{1*}, \sigma > \sigma_{1*}^0; \\ E_{2*}, \sigma \leq \sigma_{1*}^0; \end{cases}$$

g – функция учёта пластической деформации при реализации динамического процесса

$$g(\sigma - f(\varepsilon)) = \begin{cases} \eta(\sigma - f(\varepsilon))^\chi, \sigma > f(\varepsilon); \\ 0, \sigma \leq f(\varepsilon) \end{cases};$$

$E_{1*}, E_{2*}, \sigma_{1*}^0, k, \eta, \chi, m_1, m_2, v_1, v_2$ – константы расчётной модели.

Верификация математического решения задачи. В вышеприведенном математическом решении и численной реализации метода выполнен расчет кинематических параметров и напряженно-деформированного состояния фрагмента грунтовой плотины с использованием расчетной программы «STAR_T», разработанной для выполнения пространственных расчетов сложных систем «плотина-основание» с учётом реальной работы грунтов и конструкции плотины.

Длина расчетного фрагмента составляет 36 м. Откосы плотины XZ и YZ принимались как ограниченными в перемещениях, так и свободными поверхностями для оценки предельно возможных перемещений фрагмента грунтовой плотины.

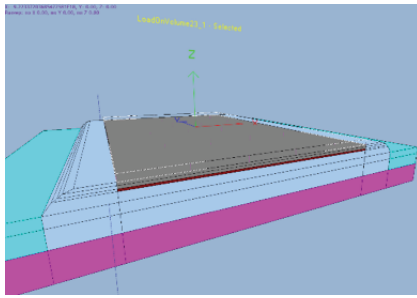
Рассматривались разные варианты нагружения грунтовой плотины квазистатической нагрузкой с модулем 150 кПа (статика с коэффициентом динамичности) и нагружение динамической нагрузкой, а именно:

- квазистатика – продолжительность нагружения 10 ступеней (5 ступеней от 0 до 150 кПа и от 5 до 0);

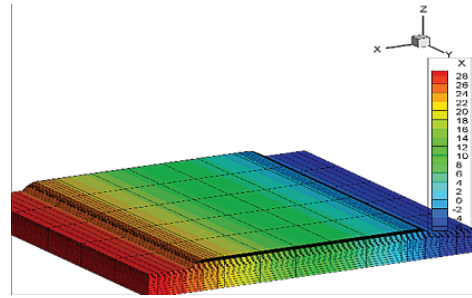
- динамическое нагружение – с учётом инерционной составляющей, продолжительность действия 1 сек. (№ 1: нарастание до максимума – 0,5 сек; № 2: нарастание до максимума практически мгновенное – 0,1 сек.).

Граничные условия принимались с целью обеспечения наиболее неблагоприятных для данного профиля плотины условий и учета различных сочетаний нагрузок [12].

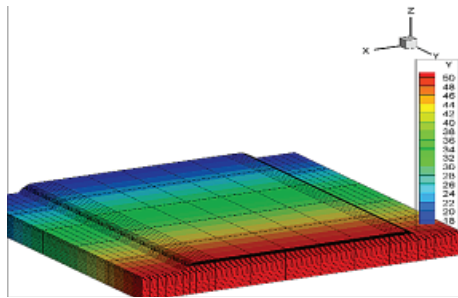
Расчетные области грунтовой плотины и разбивка на конечные элементы приведены на рисунке.



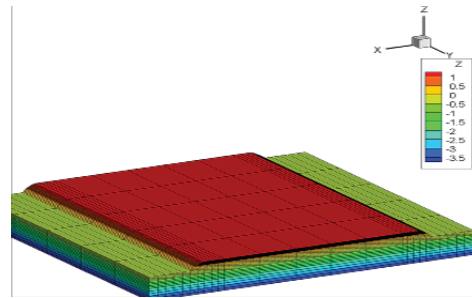
Расчетный фрагмент грунтовой плотины



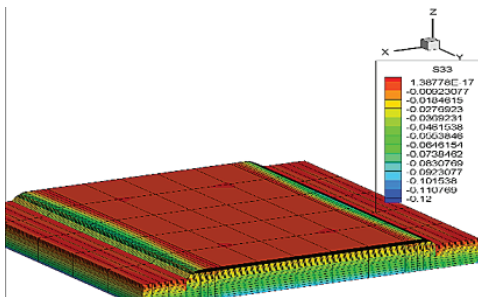
Конечно-элементная сетка: визуализация расчетного фрагмента плотины по оси X



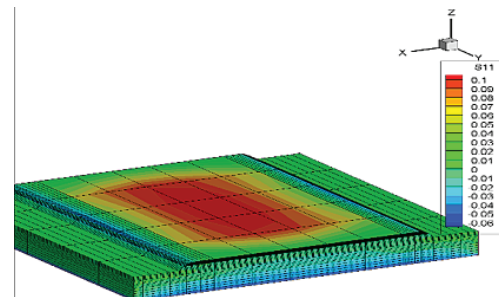
Конечно-элементная сетка: визуализация расчетного фрагмента плотины по оси Y



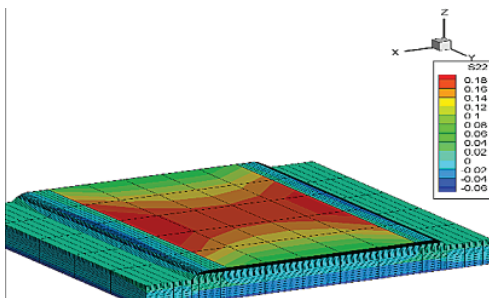
Конечно-элементная сетка: визуализация расчетного фрагмента плотины по оси Z



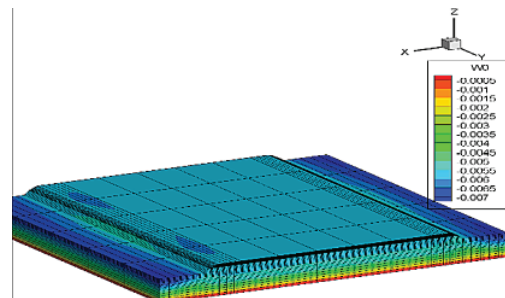
Вертикальные нормальные напряжения в теле плотины от собственного веса без нагрузки, МПа



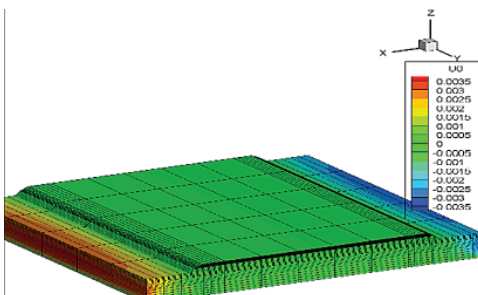
Горизонтальные нормальные напряжения в теле плотины по оси X от собственного веса без нагрузки, МПа



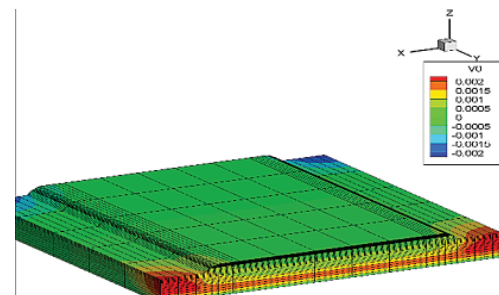
Горизонтальные нормальные напряжения в теле плотины по оси Y от собственного веса без нагрузки, МПа



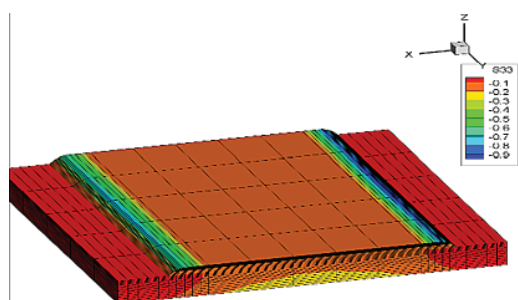
Вертикальные перемещения в статическом состоянии: перемещения поверхности тела плотины – 5 мм



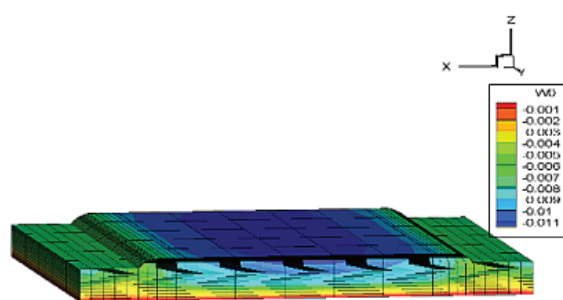
Горизонтальные перемещения (м) по оси X в статическом состоянии



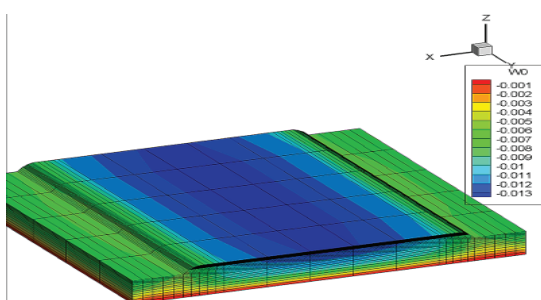
Горизонтальные перемещения (м) по оси Y в статическом состоянии



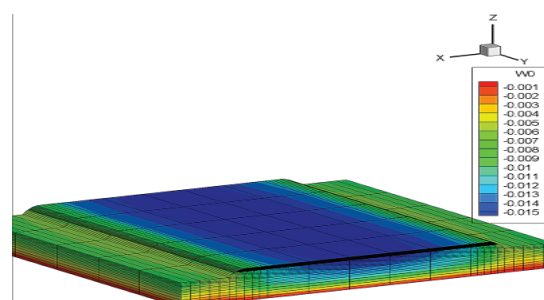
Вертикальные напряжения (МПа) в расчетном фрагменте плотины при достижении максимума нагрузки (150 кПа)



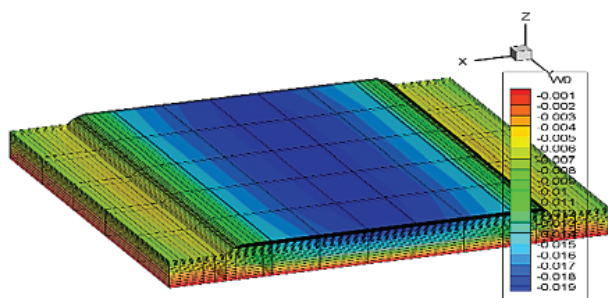
Шкала распределения вертикальных перемещений (м): начало динамического воздействия (max перемещения 11 мм)



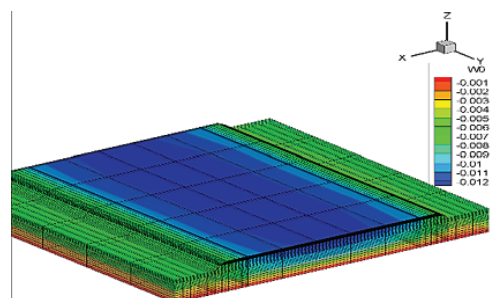
Шкала распределения вертикальных перемещений (м): нарастание динамического воздействия (max перемещения 13 мм)



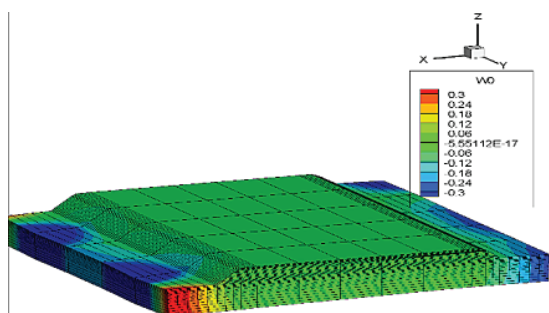
Шкала распределения вертикальных перемещений (м): нарастание динамического воздействия (max перемещения 15 мм)



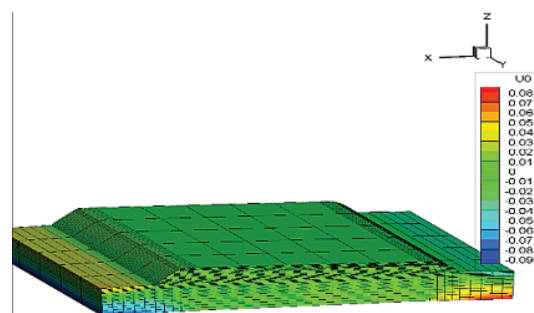
Шкала распределения вертикальных перемещений (м): достижение нагрузки 150 кПа (max перемещения 19 мм)



Шкала распределения вертикальных перемещений (м): снижение нагрузки (max перемещения 19 мм)



Незакрепленные откосы плотины при действии интенсивной динамической нагрузки (нарастание 0,5 сек): вертикальные перемещения откосов плотины по оси X – 30 см



Незакрепленные откосы плотины при действии интенсивной динамической нагрузки (нарастание 0,5 сек): горизонтальные перемещения по оси X – 40 мм

Рис. Результаты расчета фрагмента грунтовой плотины с использованием программы «STAR_T»

Результаты расчётного обоснования плотины с конкретными физико-механическими показателями грунтов показывают, что несущая способность объекта при изменении физико-механических

характеристик в условиях динамического воздействия не обеспечивается. Требуется предусмотреть мероприятия по обеспечению устойчивости напорного грунтового сооружения.

Выводы

Корректность математического решения поставленной задачи на основе численной реализации пространственной неупругой задачи с помощью метода конечных разностей и конечных элементов в Лагранжевой постановке с применением модели грунта, которая описывается теорией пластического течения для сдвига с учётом скорости нагружения при объёмном деформировании, подтверждается практикой и результатами её реализации в программно-вычислительном комплексе для оценки несущей способности напорных грунтовых сооружений, находящихся в конкретных природно-климатических условиях.

Библиографический список

1. **Vorovoi A.A., Evdokimov P.D., Pravedny G.Kh.** Design and Construction of Impervious Elements of Earth and Rockfill Dams. USSR Experience. International Commission on Large Dams, XI Congress, 11-15 June, Madrid, 1973. 15 p.
2. **Budweg F.** Safety improvements taught by dam incidents and accidents in Brasil // Proc. of the XIV. Intern. Congres des Grands Barrages. Vol. 1. Q. 52. R. 73. p. 1254-1262.
3. **Clough K.W., Woodward R.S.** Analysis of embankment stresses and deformation // Proc. ASCE, 1967, July. Sm. 4. Vol. 93. p. 529.
4. World Register of Dams. – Paris: ICOLD, 1985. 753 p.
5. **Новацкий В.** Теория упругости. – М.: Изд-во Мир, 1975. – 872 с.
6. **Самарский А.А. Вабищевич, П.Н.** Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
7. **Мельников А.В., Сахаров И.И.** Определение параметров напряженно-деформированного состояния, промерзающего пучинистого грунта в неоднородной постановке // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – 7 с.
8. **Киселев М.Ф.** Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1978. – 174 с.
9. **Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф.** Здания и сооружения на крайнем севере. – Л.: Госстройиздат, 1963. – 492 с.
10. **Фадеев А.Б.** Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
11. Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники / Кудрявцев С.А., Парамонов В.Н., Сахаров И.И. и др. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2014. – 162 с.
12. **Снежко В.Л., Паливец М.С., Абдуллаев И.И.** Возможность применения эффекта инъекции в водопропускных гидротехнических сооружениях / В.Л. Снежко, М.С. Паливец, И.И. Абдуллаев // Природообустройство. – 2019. – № 4. – С. 55-60.

Материал поступил в редакцию 15.05.2020 г.

Сведения об авторах

Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Сельскохозяйственное строительство и экспертиза объектов недвижимости», ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. Академическая, 44; e-mail: zharnitskiy@mail.ru

Андреев Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сельскохозяйственноестроительство и экспертиза объектов недвижимости» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. Академическая, 44; e-mail: andreev-rf@mail.ru

Коваль Сергей Всеволодович, доктор технических наук, кафедра «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО РУТ «МИИТ»; 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; e-mail: lavrik2811@yandex.ru

V.YA. ZHARNITSKY, E.V. ANDREEV, S.V. KOVAL

¹ Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

² Federal state budgetary autonomous institution of higher education «Russian university of transport MIIT», Moscow, Russian Federation

NUMERICAL STUDY OF THE DYNAMIC IMPACT ON THE SOIL DAM

Due to the increasing number of ownerless hydraulic structures being in the unsatisfactory operational condition in the territory of Russia and CIS countries, the probability of the anthropogenic threat in the territories adjacent to HS increases

annually. In this regard, the tasks on improvement and development of measures to prevent accidents and analyze the degradation activity of existing hydraulic structures of this class become urgent. Terrorist threats to critical water facilities have increased in recent years. Due to the lack of security measures and preliminary assessment of potential damage from the destruction of hydraulic structures, they fall into the category of high-risk facilities. The main task of these studies is to develop a method of design justification of soil dam stability under dynamic impact conditions. As a result of the study, kinematic parameters and stress-deformed state of the soil dam fragment were calculated using a software complex designed to perform spatial calculations of complex dam-base systems taking into account the actual operation of the soils and the dam design. Different versions of loading the soil dam fragment with static and dynamic loads are considered.

Hydro technical structure, destruction of hydro technical structure, dynamic impact, extended structures, impact assessment, impact prediction, pressure elements of dams, risk of destruction.

References

1. **Borovoi A.A., Evdokimov P.D., Pravedny G.Kh.** Design and Construction of Impervious Elements of Earth and Rockfill Dams. USSR Experience. International Commission on Large Dams, XI Congress, 11-15 June, Madrid, 1973. 15 p.
2. **Budweg F.** Safety improvements taught by dam incidents and accidents in Brasil // Proc. of the XIV. Intern. Congres des Grands Barrages. Vol. 1. Q. 52. R. 73. p. 1254-1262.
3. **Clough K.W., Woodward R.S.** Analysis of embankment stresses and deformation // Proc. ASCE, 1967, July. Sm. 4. Vol. 93. p. 529.
4. World Register of Dams. – Paris: ICOLD, 1985. – 753 p.
5. **Novatsky V.** Teoriya uprugosti. – M.: Izd-vo Mir, 1975. – 872 s.
6. **Samarsky A.A., Vabishevich P.N.** Vy-chislitel'naya teploperedacha. – M.: Editorial URSS, 2003. – 784 s.
7. **Melnikov A.V., Sakharov I.I.** Opre-delenie parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya, promerzayushchego puchinnistogo grunta v neodnomernoj postanovke //Sovremennye problem nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 1. – 7 s.
8. **Kiselev M.F.** Teoriya szhigaemosti ot-taivayushchih gruntov pod davleniem. – L.: Strojizdat. Leningr. otdelenie, 1978. – 174 s.
9. **Velli Yu.Ya., Dokuchaev V.V., Fedo-rov N.F.** Zdaniya i sooruzheniya na rkainem severe. – L.: Gosstrojizdat, 1963. – 492 s.
10. **Fadeev A.B.** Metod konechnyh ele-mentov v geomehanike. – M.: Nedra, 1987. – 224 s.
11. Ispolzovanie metoda konechnyh ele-mentov v reshenii zadach geotekhniki/ Rud-ryavtsev S.A., Paramonov V.N., Saharov I.I. i dr. – Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2014. – 162 s.
12. **Snezhko V.L., Palivets M.S., Ab-dullaev I.I.** The possibility of applying the injection effect in culverts / V.L. Snezhko, M.S. Palivets, I.I. Abdullaev // Envi-ronmental Engineering. – 2019. – No. 4. – S. 55-60.

The material was received at the editorial office
15.05.2020

Information about the authors

Zharnitskiy Valerij Yakovlevich, doc-tor of technical sciences, professor of the de-partment «Agricultural construction and exa-mination of real estate objects», FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., 44; e-mail: zharnitskiy@mail.ru

Andreev Evgenij Vladimirovich, candi-date of technical sciences, associate professor of the department « Agricultural construction and examination of real estate objects», FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., 44; e-mail: andreev-rf@mail.ru

Koval Sergej Vsevolodovich, doc-tor of technical sciences, department «Brid-ges and tunnels», FSAEI HE «Russian university of transport»; 127994, GSP-4, Moscow, ul. Obraztsova, 9, str. 9; e-mail: lavrik2811@yandex.ru