

Оригинальная статья

УДК 502/504: 627.82:532.59

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-68-74

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

ЖАРНИЦКИЙ ВАЛЕРИЙ ЯКОВЛЕВИЧ¹✉, д-р техн. наук, профессор
zharnitskiy@mail.ru

АНДРЕЕВ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ²✉, канд. техн. наук, доцент
andreev-rf@mail.ru

БАЮК ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ^{3,2}, канд. техн. наук, доцент
oleg_bayuk@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

² РАНХиГС. Институт государственной службы и управления; 119571, г. Москва, проспект Вернадского, 82, стр. 1, офис 3329, Россия

³ Финансовый университет при правительстве Российской Федерации; 125993, г. Москва, Ленинградский проспект, 49, Россия

Для оценки сходимости и устойчивости методов по прогнозу остаточного ресурса напорных гидротехнических сооружений от общего действия удара и газодинамических воздействий было проведено сравнение аналитического и численного решений посредством применения их к смешанной краевой задаче, содержащей начальные и граничные условия. В статье рассмотрена задача о неэксплуатационном нагружении напорного гидротехнического сооружения с заданным профилем. Для оценки сходимости и устойчивости разработанного численного метода решения задачи о пространственном движении напорного гидротехнического сооружения с учетом взаимодействия с его основанием проведено сравнение аналитического и численного решений задачи о нагружении напорного гидротехнического сооружения с известным поперечным сечением, рассмотрено численное решение задачи о динамическом нагружении абсолютно жесткого 6-гранного штампа, моделирующего эксперимент по динамическому нагружению абсолютно жесткого круглого штампа, проведено сравнение результатов, полученных по независимым методикам расчета, с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, подошва плотины, прогноз остаточного ресурса, аналитическое решение, численное решение, динамическая нагрузка на грунтовую плотину, контактное напряжение, оценка сходимости, алгоритм расчета, тестовая задача, эксплуатационное состояние гидротехнического сооружения, взрыв, излучение, контактная поверхность, откос гидротехнического сооружения

Формат цитирования: Жарницкий В.Я., Андреев Е.В., Баюк О.А. Численное исследование кинематических параметров грунтовой плотины в условиях модельного эксперимента // Природообустройство. – 2021. – № 5. – С. 68-74. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-68-74.

© Жарницкий В.Я., Андреев Е.В., Баюк О.А., 2021

Original article

NUMERICAL STUDY OF THE KINEMATIC PARAMETERS OF AN EARTH DAM IN A MODEL EXPERIMENT

ZHARNITSKY VALERY YAKOVLEVICH¹✉, doctor of technical sciences, Professor
zharnitskiy@mail.ru

ANDREEV EVGENY VLADIMIROVICH²✉, candidate of technical sciences, associate professor
andreev-rf@mail.ru

BAYUK OLEG ALEKSANDROVICH^{3,2}, candidate of technical sciences, associate professor

oleg_bayuk@mail.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev: 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49. Russia

² RANEPa. Institute of Public Service and Management; 119571, the Russian Federation, Moscow, Vernadskogo Ave., 82-1, office 3329. Russia

³ Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, 125993, Moscow, Leningradsky Prospekt, 49. Russia

To assess the convergence and stability of the methods for predicting the residual life of pressure hydrotechnical structures of general impact and gas-dynamic effects, a comparison of the analytical and numerical solutions was carried out by applying it to a mixed boundary value problem, cumulative initial and boundary conditions. The article deals with the problem of loading a pressure head hydraulic structure with a given profile. To assess the convergence and stability of the developed numerical method for solving the problem of the spatial motion of a pressure head hydraulic structure, taking into account the interaction with its base, a comparison was made of the analytical and numerical solutions of the problem of loading a pressure head hydraulic structure with a known cross section, and a numerical solution of the problem of dynamic loading of an absolutely rigid 6- a faceted stamp simulating an experiment on dynamic loading of an absolutely rigid round die, the results obtained by independent calculation methods are compared with the available experimental data.

Keywords: hydraulic structures, dam base, residual life forecast, analytical solution, numerical solution, dynamic load on an earth dam, contact stress, convergence assessment, calculation algorithm, test problem, operational state of a hydraulic structure, explosion, radiation, contact surface, hydraulic structure slope

Format of citation: Zharnitsky V.Ya, Andreev E.V., Bayuk O.A. Numerical study of the kinematic parameters of an earth dam in a model experiment // Prirodobustrojstvo. – 2021. – № 5. – S. 68-74. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-68-74.

Введение. Одним из определяющих при выборе профиля напорного грунтового сооружения является вопрос о характере распределения нормальных контактных напряжений по подошве плотины, значения кинематических параметров сооружения, а также интегральных составляющих реактивной нагрузки на грунтовую плотину при действии интенсивных динамических нагрузок.

Для оценки сходимости и устойчивости разработанного численного метода по прогнозу остаточного ресурса грунтовых плотин от общего действия удара и газодинамического воздействия при взрыве было проведено сравнение аналитического и численного решений посредством применения их к смешанной краевой задаче, содержащей начальные и граничные условия, для которой известно точное решение.

Рассматривается задача о нагружении бесконечно длинного упругого тела. Для некоторых значений отношения ширины поперечного сечения к высоте, при условии отсутствия напряжений на поверхности, точное решение задачи дано в источнике [1]. Решение для составляющих компонент вектора скоростей определяется по формулам:

$$V_1 = \frac{i\pi^3}{8b^3} \omega \left(A\zeta \sin \pi\zeta \sin \frac{\xi x_1}{2} - C_1 \zeta \sin \frac{\pi\eta x_1}{2} \right) \cdot \zeta \left(\cos \frac{\pi\alpha x_3}{2} \right) \left(\cos \frac{\pi\zeta x_2}{2} \right) \exp \left(\frac{i\pi\omega t}{2} \right); \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{i\pi^3}{8b^3} \omega \left(A\zeta \cos \pi\zeta \frac{x_1}{2} + C_1 \eta \cos \pi\eta \frac{x_1}{2} \right) \cdot \zeta \left(\cos \pi\alpha x_3 \right) \left(\sin \pi\zeta \frac{x_2}{2} \right) + (C_2 \xi - B\beta) \cdot \left(\cos \pi\zeta \frac{x_3}{2} \right) \left(\sin \pi\zeta \frac{x_2}{2} \right) \exp \left(\frac{i\pi\omega t}{2} \right); \quad (2)$$

$$V_3 = \frac{i\pi^3}{8b^3} \omega \left[A\zeta \sin \pi\alpha \frac{x_3}{2} + B(\zeta^2 + \xi^2) \left(\sin \pi\beta \frac{x_3}{2} \right) \right] \cdot \left(\cos \pi\zeta \frac{x_1}{2} \right) \left(\cos \pi\zeta \frac{x_2}{2} \right) \exp \left(\frac{i\pi\omega t}{2} \right), \quad (3)$$

где $i = (-1)$, безразмерные величины $a, \beta, \zeta, \eta, \xi$ отвечают следующим условиям:

$a = m, \beta = n$ (m, n – чётные целые числа);

$\zeta = p, \eta = q$ (p, q – чётные целые числа):

$$\omega = \left[\frac{(s^2 - r^2)}{(\gamma^2 - 1)} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (4)$$

$$\omega = \left[\frac{(s^2 - \gamma^2 r^2)}{(\gamma^2 - 1)} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где $2a$ и $2b$ – ширина и высота поперечного сечения тела, измеренные соответственно в направлении осей x_1 и x_3 (координата x_2 направлена вдоль оси стержня), а s и r определяются соотношениями:

$$s^2 = n^2 + \frac{p^2 b^2}{a^2}; \quad r^2 = m^2 + \frac{p^2 b^2}{a^2}. \quad (5)$$

В качестве численного примера рассматривается задача об области грунтового гидротехнического сооружения квадратного поперечного сечения при $\gamma = 2$ и при значениях m, n, p, q . Выбранные заранее, они соответствуют частному случаю, для которого фазовая скорость ω/ζ равна скорости продольной волны. Для указанных выше значений постоянные B, C_1 и C_2 определяются следующими равенствами:

$$B = C_1 = \frac{A}{1^3}; \quad C_2 = 0, \quad (6)$$

где A – произвольная постоянная, которая в данном примере равна

$$A = \frac{8b^3}{\pi^3}. \quad (7)$$

При численной реализации разбиение области производилось соответственно по осям x, y, z на $50 \times 50 \times 150, 70 \times 70 \times 150, 90 \times 90 \times 150$ элементов. Решение получено в безразмерном виде для времен порядка 15 пробегов.

Начальные условия, определяемые из точного решения при $t = 0$, задаются в точках кубической сетки (с шагом h), построенной в пространстве, занятом телом.

Заключение об устойчивости и сходимости численного метода в среднеквадратичном смысле можно сделать при сравнении точной величины полной энергии системы с полной величиной, определяемой из численного решения. Плотность полной энергии (сумма плотности кинетической энергии и плотность энергии упругой деформации) представляется как

$$W = \frac{\tilde{W}}{\rho c^2} = \frac{1}{2} U^k U^k, \quad (8)$$

где W и \tilde{W} являются соответственно безразмерной и размерной величинами плотности полной энергии.

Сумма трех членов в уравнении (8) представляет собой плотность кинетической энергии, в то время как сумма остальных членов – плотность энергии упругой деформации. Полная энергия системы определяется интегрированием плотности энергии по объему рассматриваемой области. Интегрирование проводится как для точного, так и для численного решений, с использованием формулы трапеции на основе значений энергии в узлах сетки рассматриваемой области. Ошибка в величине полной энергии, полученной из численного решения, определяется как разность значений полной энергии, определенной из точного и численного решений. Ввиду того,

что обе величины энергии вычисляются аналогичным образом, предполагается, что ошибка, появляющаяся в результате приближенного интегрирования плотности энергии, не оказывает влияния на ошибку численного метода.

Материалы и методы исследований.

Для исследования характера распределения нормальных контактных напряжений и кинематических параметров, оценки достоверности разработанной методики прогноза остаточного ресурса грунтовых плотин от общего действия удара и газодинамического воздействия при взрыве рассмотрено численное решение задачи о динамическом нагружении абсолютно жесткого штампа шестигранной в плане формы, приближенно моделирующим проведенный эксперимент [2] по динамическому нагружению абсолютно жесткого круглого штампа. Проведено сравнение экспериментальных данных по симметричному динамическому нагружению круглого, абсолютно жесткого штампа, с численными результатами, полученными по различным методикам расчета (одномерный – упругий и упругопластический, осесимметричный – упругий и упругопластический, трехмерный – упругий и упругопластический). Схема проведения численного эксперимента и трехмерная расчетная область представлены на рисунке 1.

Физический эксперимент проводился для трех типов нагружений (рис. 2) соответственно для трех штампов диаметром 0,6; 0,9; 1,2 м. Численное моделирование по всем методикам расчета проводилось для песчаных грунтов с модулями деформирования $E = 100$ МПа и $E = 72,8$ МПа.

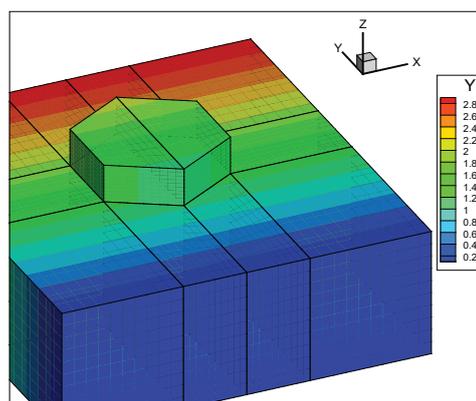
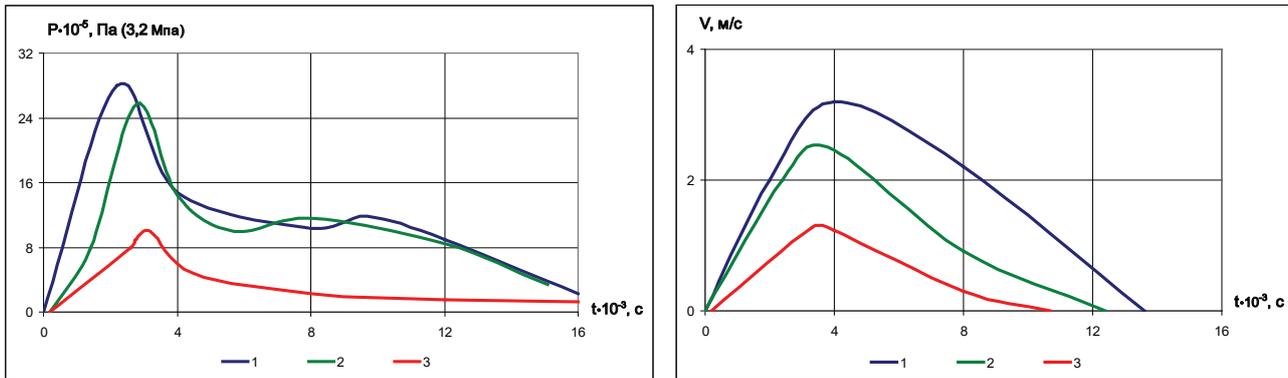


Рис. 1. Схема штампа с описанной окружностью $R = 1,2$ м: цветовая индикация – координата «Y» в интервале 0,0...2,8 м

Fig. 1. Scheme of the stamp with the circumscribed circle $R = 1.2$ m: color indication – coordinate «Y» in the interval of 0.0...2.8 m



Давление на покрытие штампа

Pressure on the stamp coating

Скорости штампов (эксперимент)

Velocities of the stamps (experiment)

Рис. 2. Измеренные в эксперименте действующие на штампы нагрузки и скорости движения штампов:

1 – $R = 0,3$ м; 2 – $R = 0,45$ м; 3 – $R = 0,6$ м

Fig. 2. Measured in the experiment acting on the stamps loads and velocities of movement of stamps:

1 – $R = 0.3$ m; 2 – $R = 0,45$ m; 3 – $R = 0,6$ m

Принимались следующие граничные условия: на контакте штамп-полупространство – условие спайки $V_{шт} = V_r$; на внешних нефизических границах области – условие упругого пропускания, исключающее влияние волн отражения на результаты расчета в течение всего времени расчета. В качестве нагрузки задавались измеренные в эксперименте, реально действующие на штамп нагрузки $P(t)$. Граничные условия для штампов задавались уравнением движения штампа вида

$$\frac{mdV}{dt} = P(t)F + F\sigma + mg \quad (9)$$

с нулевыми значениями скорости движения штампа $V(x, y, 0) = 0$ в начальный момент времени.

Сравнение проводилось для грунтов типа 1 – $E = 72,8$ МПа; 2 – $E = 100$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$.

Результаты и обсуждение. Практически качественная картина изменения напряжений во времени примерно одинакова для экспериментальных и расчетных данных, но в отличие от эксперимента и осесимметричного двумерного расчета для штампа с размером 0,6 м напряжения под центром штампа монотонно нарастают до *max* к 10 мс и имеют значение 2,4 МПа, в то время как экспериментальные кривые имеют *max* 1,4 МПа к 3 мс и далее монотонно убывают, а кривые, полученные по осесимметричной двумерной методике [3], имеют *max* к 12 мс и составляют 2,8 МПа.

В дальнейшем (после 12 мс) поведение решения для осесимметричной двумерной

и трехмерной задач имеют примерно одинаковый характер. Наиболее близкими к эксперименту в расчете по трехмерной методике являются результаты для грунтов с модулем деформации $E = 100$ МПа. При данном варианте нарастание напряжений до максимальных значений 1,32 МПа происходит к 5-й мс. Далее напряжения к 18 мс монотонно убывают до 0. Разброс значений величин напряжений под центром штампа на временном интервале от 4 до 18 мс не превышает 20% [4-6].

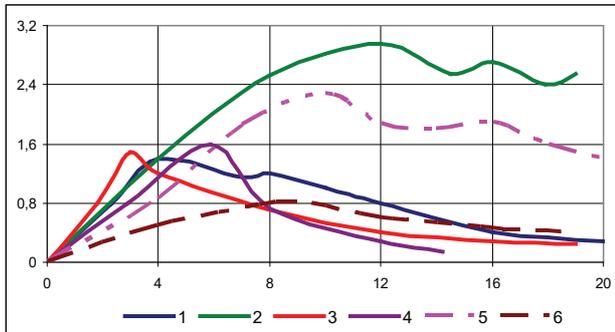
Для штампов с размером 0,9 и 1,2 м решение по трехмерной методике ведет себя примерно так же, формируя максимальные напряжения к 9...10 мс, соответственно со значениями максимальных напряжений 1,6 и 6 МПа для штампов 0,9 и 1,2 м. Упругое же решение для осесимметричной задачи приближенно совпадает с трехмерным только для штампа 0,9 м, но, как и для штампа 0,6 м, в начальные моменты времени нарастание напряжений до максимума идет практически по экспериментальной кривой. Для штампа с размером 1,2 м результаты расчета по осесимметричной двумерной и трехмерной методикам несколько различны. Кривая по осесимметричному расчету до 8 мс практически совпадает с экспериментом, а по трехмерной, как для штампов 0,6 и 0,9 м, – прежняя картина нарастания напряжений до *max* 0,6 МПа к 10 мс с дальнейшим монотонным убыванием.

Как и для штампа с размером 0,6 м, наилучшее совпадение экспериментальных данных с результатами расчета по трехмерной методике штампов с размерами соответственно

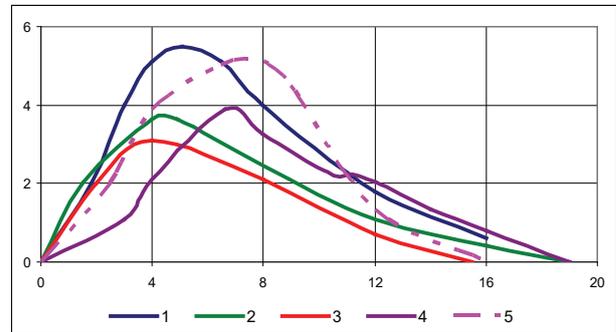
0,9 и 1,2 м наблюдается для грунтов с модулем деформации $E = 100$ МПа.

Результаты расчетов приведены на рисунке 3. Графики изменения скоростей движения под центром штампа во времени по различным методикам приведены на ри-

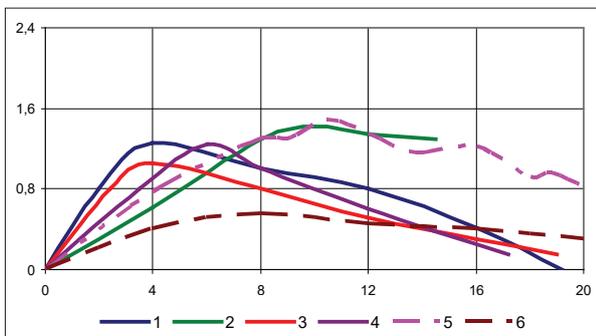
сунке 4 и имеют вид, близкий к характеру изменения напряжений. На рисунке 5 приведено распределение вертикальных перемещений W_{33} в системе «Штамп-грунт» после полной разгрузки [7-10]. Для $T = 16$ м/с перемещения составляют $W = 18$ мм.



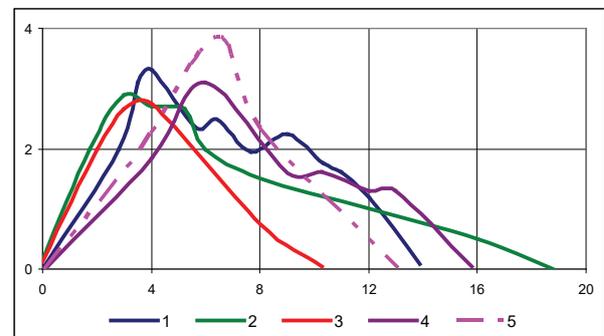
Радиус штампа – 0,3 м
Radius of the stamp – 0.3 m



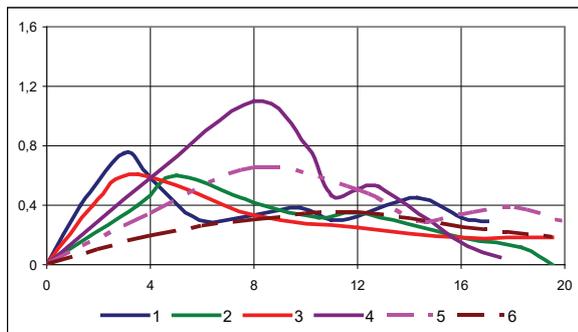
Радиус штампа – 0,3 м
Radius of the stamp – 0.3 m



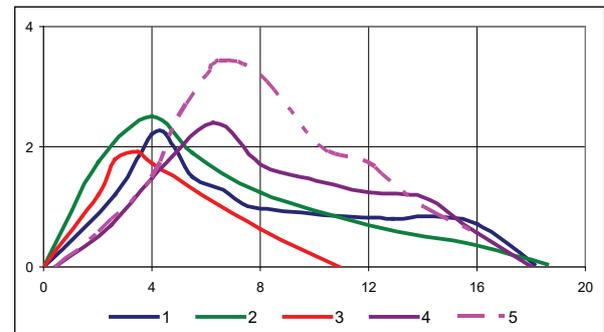
Радиус штампа – 0,45 м
Radius of the stamp – 0.45 m



Радиус штампа – 0,45 м
Radius of the stamp – 0.45 m



Радиус штампа – 0,6 м
Radius of the stamp – 0.6 m



Радиус штампа – 0,6 м
Radius of the stamp – 0.6 m

- $E = 100$ МПа;
- $E = 72,8$ МПа;
- эксперимент;
- осесиммет. упр.–пластич.;
- осесиммет. упругое;
- одномерное упругое.

- осесиммет. упр.–пластич.;
- трёхмерное упругое;
- эксперимент;
- осесиммет. упругое;
- одномерное упругое.

Рис. 3. Изменение напряжений во времени под центром штампа

Fig. 3. Stress change in time under the central stamp

Рис. 4. Изменение скоростей движения штампа во времени

Fig. 4. Change of the stamp velocities in time

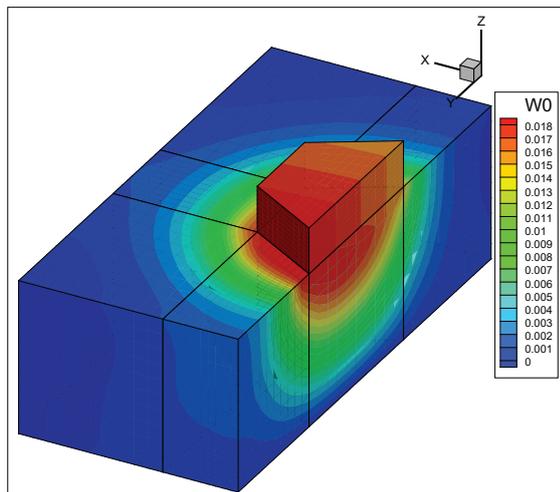


Рис. 5. Распределение вертикальных перемещений W_{33} в системе «Штамп-тело плотины» после полной разгрузки: $T = 16$ м/с; перемещения $W = 18$ мм

Fig. 5. Distribution of vertical displacements W_{33} in the system «stamp-body of the dam» after full unloading: $T = 16$ m sec; displacement $W = 18$ mm

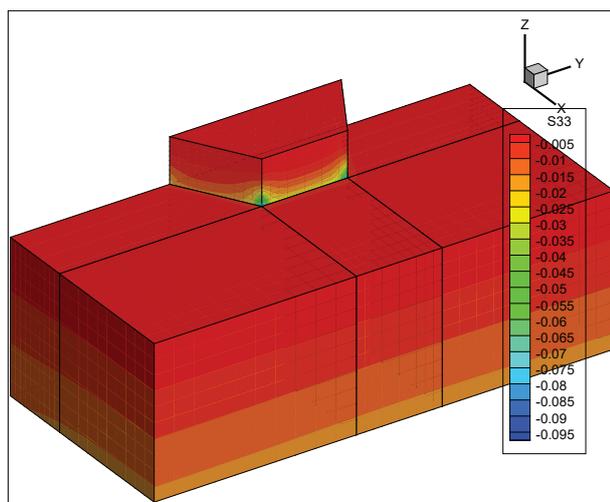


Рис. 6. Характер распределения вертикальных контактных напряжений S_{33} под штампом на ребрах и в угловых точках для $T = 20$ м/с

Fig. 6. Nature of the distribution of vertical contact stresses S_{33} under the stamp on the ribs and at the corner points for $T = 20$ m sec

Библиографический список

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.

На рисунке 6 приведен характер распределения вертикальных контактных напряжений S_{33} , МПа на ребрах и угловых точках для штампа размером радиуса описанной окружности $R = 0,6$ м в момент времени $T = 20$ м/с. Ярко выражена концентрация напряжений в угловых точках на контакте «Штамп-тело плотин», составляющих примерно $0,1$ МПа.

Для сравнения с графиками рисунка 3, штамп $R = 0,6$ м, напряжения под центром штампа для различных данных составляют $0 \dots 0,3$ МПа. Полученные результаты показывают удовлетворительное совпадение численных и экспериментальных данных.

Выводы

Для проверки основных положений разработанной методики и алгоритма расчета состояния напорных грунтовых сооружений от действия нестационарных нагрузок проведены расчеты ряда тестовых задач, выполнены сравнения численных и аналитических результатов для задачи об ударе массой по телу грунтовой плотины, проведен численный математический эксперимент, моделирующий реальное нагружение грунтовой плотины.

Для оценки сходимости и устойчивости разработанного численного метода решения задачи о пространственном движении (смещении) сооружения с учетом взаимодействия с основанием проведено сравнение известного аналитического и численного решений задачи о нагружении бесконечного упругого тела прямоугольного поперечного сечения сооружения, рассмотрено численное решение задачи о динамическом нагружении абсолютно жесткого 6-гранного штампа, приближенно моделирующего эксперимент по динамическому нагружению абсолютно жесткого круглого штампа, сравнены результаты, полученные по различным независимым методикам расчета с имеющимися экспериментальными данными.

Все полученные результаты подтверждают корректность разработанных методик, их эффективность и достоверность при прогнозе остаточного ресурса грунтовых плотин от общего действия удара и газодинамического воздействия при взрыве.

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. 15p.

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. **Кудрявцев С.А., Парамонов В.Н., Сахаров И.И.** Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2014. – 162 с.

4. **Новацкий В.** Теория упругости. – М.: Изд-во «Мир», 1975. – 872 с.

5. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

6. **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.

7. **Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф.** Здания и сооружения на крайнем севере. – Л.: Госстройиздат, 1963. – 492 с.

8. **Киселев М.Ф.** Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1978. – 174 с.

9. **Clough K.W., Woodward R.S.** Analysis of embankment stresses and deformation // Proc. ASCE, 1967. July. Sm. 4. Vol. 93. P. 529.

10. **Фадеев А.Б.** Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 224 с.

Критерии авторства

Жарницкий В.Я., Андреев Е.В., Баяк О.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 15.05.2021 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2021 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

4. **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. **Kudryavtsev S.A., Paramonov V.N., Sakharov I.I.** Ispolzovanie metodov konechnykh elementov v reshenii zadach geotehniki. – Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2014. – 162 s.

4. **Novatskij V.** Teoriya uprugosti. – M.: Izd-vo Mir, 1975. – 872 s.

5. **Samarsky A.A., Vabishchevsky P.N.** Vychislitelnaya teploperedacha. – M.: Editorial URSS, 2003. – 784 s.

6. **Melnikov A.V., Sakharov I.I.** Opredelenie parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya, promerzayushchego puchinistogo grunta v neodnomernoj postanovke // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 1. – 7 s.

7. **Velli Yu.Ya., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F.** Zdaniya i sooruzheniya na krainem severe. – L.: Gosstrojizdat, 1963. – 492 s.

8. **Kisilev M.F.** Teoriya szhimaemosti ottaivayushchih gruntov pod davleniem. – L.: Strojizdat. Leningr. otделение, 1978. – 174 с.

9. **Clough K.W., Woodward R.S.** Analysis of embankment stresses and deformation//Proc. ASCE, 1967, July. Sm. 4. Vol. 93. p. 529.

10. **Fadeev A.B.** Metod konechnykh elementov v geomexhanike. – M.: Nedra, 1987. – 224 s.

Criteria of authorship

Zharnitsky V.Ya., Andreev E.V., Bayuk O.A. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 15.05.2021

Approved after reviewing 18.10.2021

Accepted for publication 01.11.2021