

УВЛАЖНЕНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ВОДОХРАНИЛИЩА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Бахтиёр Ю.А. ДОШЕВ, Ph.D, доцент,

Алишер ИШИМАТОВ, к.ф.м.н.

Национальный исследовательский университет

«Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

Аннотация

Для решения плоской задачи о распределении увлажнения среды в грунтовой плотине рассматривается трапециевидальное сечение, находящееся в плоско-деформируемом состоянии. В результате конечно-элементной дискретизации для нестационарной задачи о распределении влаги по всей области, в результате максимального увлажнения части свободной поверхности, получена разрешающая система дифференциальных уравнений, для решения которой использован алгоритм, основанный на методе Ньюмарка.

Ключевые слова: гидротехника, плотина, сооружение, влагоперенос, фильтрация, неоднородность, расчет, методика, конечные элементы.

В настоящее время имеются многочисленные результаты экспериментальных исследований по изменению физико-механических характеристик лессовых грунтов и их просадочности при различной степени их увлажнения [1-6]. В этих исследованиях показано, что при увлажнении под действием статических нагрузок, лессовые грунты претерпевают интенсивное структурное изменение. В результате меняются значения всех физико-механических параметров грунта, таких как плотность, коэффициенты Пуассона и бокового расширения, модули деформаций, пределы прочности и т.д. Следовательно, в этих грунтах с увлажнением происходит и трансформация напряженно-деформированного состояния (НДС). Несмотря на многочисленные экспериментальные материалы, практически отсутствуют модели деформирования, учитывающие влияние влажности на напряженно-деформированное состояние грунтов. Однако такие уравнения необходимы при прогнозировании НДС грунтовых сооружений и просадки грунтовых оснований, особенно если речь идет о гидротехнических сооружениях.

Проведенные экспериментальные исследования в [2-5] по просадочности лессовых грунтов при увлажнении показывают, что с увеличением влажности начинают ослабевать структурные связи между твердыми минеральными частицами грунта, особенно лесса, как следствие растворения в воде заполняющих поры грунта минеральных солей. В результате структура грунта, т.е. его твердый скелет как бы начинает «разрушаться». Однако между разрушением скелета грунта, его структуры, под действием различных нагрузок при больших деформациях и «разрушением» (изменением) структуры грунта под действием влаги имеется существенное различие. Если в первом случае это механический процесс, то во втором - это скорее физико-химический. Тем не менее, в обоих

Annotation

To solve a plane problem of the distribution of moisture in an earth dam, a trapezoidal section is considered, which is in a plane-deformable state. As a result of finite element discretization for the non-stationary problem of moisture distribution over the entire area, as a result of maximum wetting of a part of the free surface, a resolving system of differential equations was obtained, for the solution of which an algorithm based on the Newmark method was used.

Key words: hydraulic engineering, dam, construction, moisture transfer, filtration, heterogeneity, calculation, methodology, finite elements.

случаях структура грунта изменяется, изменяются его механические характеристики и уменьшаются прочностные свойства.

Известно, что деформирование грунтов в пределах нагрузок до 0,5 МПа имеет почти обратимый характер. Результаты опытов [7-9] показали, что при увлажнении этот предел уменьшается, т.е. увлажнение грунтов при одинаковых значениях напряжения приводит к увеличению деформаций и снижению прочности грунта.

По данным экспериментов [9] выявлено, что параметры прочности лессовых грунтов являются однозначными функциями от влажности, причем функциональные зависимости объемного сжатия и сдвига, силы сцепления и коэффициента угла внутреннего трения уменьшаются по экспоненциальному закону с увеличением влажности грунта [10]:

$$K(I_w) = K_{sat} \exp(\alpha K(1 - I_w)), \quad G(I_w) = G_{sat} \exp(\alpha G(1 - I_w)) \\ \alpha(I_w) = c_{sat} \exp(\beta(1 - I_w)), \quad \mu(I_w) = \mu_{sat} \exp(\gamma(1 - I_w)), \quad (1)$$

где K_{sat} , G_{sat} , c_{sat} , μ_{sat} – соответственно модули объемного сжатия и сдвига, сила сцепления и коэффициент угла внутреннего трения полностью увлажненного грунта; K , G , β , γ – эмпирические безразмерные коэффициенты, характеризующие степень изменения соответствующих механических характеристик просадочного грунта; $I_w = w/w_{sat}$ – параметр, характеризующий степень увлажнения грунта; w – текущая влажность грунта; w_{sat} – влажность, соответствующая полному заполнению пор грунта водой.

Таким образом, выбираемая модель деформирования при исследовании напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов, контактирующих с водной средой, должна учитывать переменность механических характеристик грунтов в зависимости от степени увлажненности.

Следует [10], где разработаны нелинейные законы деформирования с учетом структурных разрушений

грунта при объемном деформировании, и, основываясь на результатах исследований [2-5], модель объемного деформирования грунта с учетом влажности можно написать в виде зависимости [10]:

$$\frac{dP}{dt} = K(w, \theta) \exp(\alpha(1-I)) \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

основу которой представляет уравнение состояния упругой среды. Здесь используются следующие обозначения: $P=(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)/3$ – полное давление; $\theta=\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z$ – полная деформация; $I=I_w+I_\sigma$, I_w – параметр, характеризующий структурное изменение грунта под действием влаги, а I_σ – при действии сжимающей нагрузки.

Следуя [10], принимаем

$$I_\sigma = \theta/\theta^*, \quad (3)$$

где θ^* – значение объемной деформации, при которой структура грунта полностью претерпевает изменение;

$$I_w = W/W^*, \quad (4)$$

где W^* – значение влажности, при которой скелет грунта полностью теряет прочность.

Здесь необходимо отметить, что значения I_σ и I_w меняются в пределах от 0 до 1. Следовательно, значение I может в предельном случае достигать 2. Однако в расчетах значение $I \leq 1$.

Расчетные значения параметров модели грунта выбирались согласно [10]: $K^*=10 \text{ МПа}$; $\alpha=2,5$; $\theta^*=0,3$.

Процесс фильтрации влаги сквозь грунтовую среду описывается квазигармоническим уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \left(Q^* - \mu \frac{\partial w}{\partial t} \right) = 0 \quad (5)$$

где $w(t, x, y)$ – неизвестная однозначная в рассматриваемой области функция увлажнения; k_x, k_y – известные функции координат – коэффициенты фильтрации (в случае $k_x \neq k_y$ – анизотропного грунтового массива); Q^* – известная функция координат и времени (в задачах, рассматриваемых ниже, эта функция представлена увлажнением верхового откоса, находящегося ниже уровня воды).

Для решения плоской задачи о распределении увлажнения среды в грунтовой плотине рассматривается трапециевидальное сечение, находящееся в плоско-деформируемом состоянии (рис.1). Верхняя и одна боковая стороны его свободны от напряжения, а нижняя часть жестко закреплена.

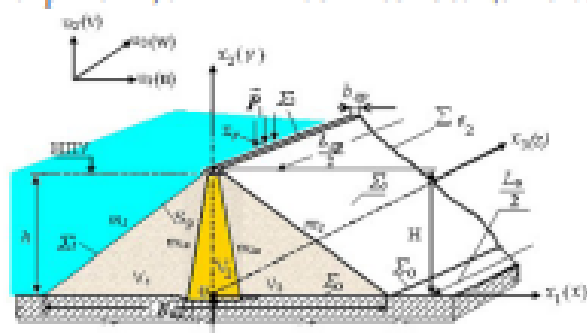


Рис.1. Модель грунтовой плотины с двояким водохранилищем.

Для решения поставленной задачи используется метод конечных элементов (МКЭ). Граничные условия на поверхности S_0 , где происходит постоянное замачивание (на части верхового откоса, находящейся ниже уровня воды), задаются максимальным значением функции увлажнения w :

$$w = w_s = w_{max} = 0,38 \quad (6)$$

На остальной части границы S_1 выполняется условие уноса влаги -

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \left(Q^* - \mu \frac{\partial w}{\partial t} \right) = 0 \quad (7)$$

где l_x, l_y – направляющие косинусы внешней нормали к граничной поверхности; αw – потеря влаги путем конвекции. При $\alpha=0$ и условие (7) сводится к известному условию непроницаемости границы

$$\frac{\partial w}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

В наших исследованиях боковые границы предполагаются проницаемыми, а основание – непроницаемым, на котором скапливается жидкость, поэтому увлажненность здесь со временем возрастает до максимального уровня

$$w_{max} = 0,38 \quad (9)$$

Уравнение (5) вместе с граничными (6)-(8) и начальными для функции $w_0=w(t=0)$ условиями однозначно определяет решение задачи на определенном интервале времени. В некоторый фиксированный момент времени производные от w по времени и все коэффициенты могут рассматриваться как заданные функции координат и тогда задача аналогична квазистатической при условии, что выражение в последнем слагаемом в (5) трактуется как независимая от времени функция координат $Q(x, y)$. В этом случае уравнение (5) эквивалентно требованию минимизации функционала

$$W = \int_V \left[\frac{1}{2} \left(k_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) - Qw \right] dv + \int_S q w ds \quad (10)$$

по всей области при тех же граничных условиях для w .

Здесь $Q = -\mu \frac{\partial w}{\partial t}$; S – поверхность области, на которой задаются граничные условия (6)-(9).

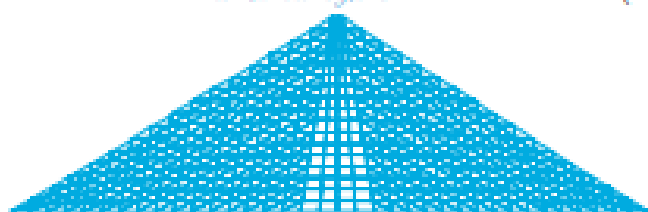
В последнее время бурно развивается метод конечных элементов для решения практических задач. С помощью этого метода изображается конечный элемент, строится матрица, производится численное интегрирование, получают матрицы для расчета конструкций и решают уравнения с численными методами.

В 1909 году Ризом был разработан эффективный метод для решения задач механики сплошных сред. Этот метод основан на аппроксимации функционала энергии с помощью неизвестных коэффициентов заданной функции, при минимизации функционала получается система уравнений, неизвестные коэффициенты определяются этими уравнениями, аппроксимирующие функции

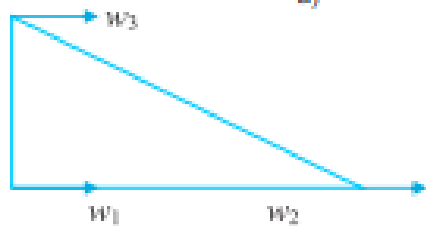
функционала должны удовлетворят граничным условиям. В 1943 году Курант при решении задачи кручения использует для треугольных зон специальные линейные функции, таким образом увеличил преимущества метода Рунда. В этом случае была предложена в виде неизвестных коэффициентов использовать значения функции в узловых точках треугольника, т.е. были отброшены требования граничных условий для функции. Впервые термин «Конечный элемент» ввел в 1960 году Клафф, в статье «Исследование задачи плоско-напряженного состояния методом конечных элементов». После этого вышеуказанный метод стал широко применяться для решения различных задач механики сплошных сред. В настоящее время в связи развитием численных методов и создания быстродействующих компьютеров, появились большие преимущества при определении деформации и напряжения для сложных элементов конструкций.

Конечно-элементная дискретизация рассматриваемой задачи получается в результате разбиения рассматриваемой области (рис.2а) на конечные элементы треугольной формы (рис.2б), с линейной аппроксимацией функции увлажнения внутри элемента

$$w = (a + bx + cy) / 2s \tag{11}$$



а)



б)

Рис.2. Конечно-элементная дискретизация модели плотины (а) треугольными элементами (б)

В результате конечно-элементной дискретизации, для нестационарной задачи о распределении влаги по всей области в результате максимального увлажнения части свободной поверхности получается следующая разрешающая система дифференциальных уравнений -

$$[C] \frac{d}{dt} \{w\} + [H] \{w\} = 0, \tag{12}$$

где матрица [H] получается в результате объединения элементарных матриц [h]е вида

$$[h] = \frac{k}{4s} \begin{bmatrix} h_1 h_1 & h_1 h_2 & h_1 h_3 \\ h_2 h_1 & h_2 h_2 & h_2 h_3 \\ h_3 h_1 & h_3 h_2 & h_3 h_3 \end{bmatrix} + \frac{k}{4s} \begin{bmatrix} c_1 c_1 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2 c_2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3 c_3 \end{bmatrix}, \tag{13}$$

а матрица [C] – в результате объединения матриц [c]:

$$[c] = \frac{d\theta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{14}$$

Решение полученной системы дифференциальных уравнений (12) дает ответ на поставленную задачу о распределении нестационарного поля увлажнения области в зависимости от времени. Для ее решения используется алгоритм, основанный на методе Ньюмарка с разложением функций и в ряды по степеням τ – шага интегрирования, приводящим к разрешающей системе алгебраических уравнений [13-15] относительно функции увлажнения w_{i+1} :

$$[A] \{w_{i+1}\} = \{P_{i+1}\}, \tag{15}$$

где

$$[A] = [H] + [C] \beta / (\alpha \tau); \tag{16}$$

$$\{P_{i+1}\} = [C] \left[\frac{\beta \{w_i\}}{\alpha \tau} + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \{\dot{w}_i\} + \frac{\tau}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \{\ddot{w}_i\} \right], \tag{17}$$

$\{w_i\}$, \dot{w}_i , \ddot{w}_i – найденные на предыдущем шаге по времени функция увлажнения и ее производные.

На первом шаге для формирования системы алгебраических уравнений используются начальные условия при $t=0$: $w=w_0$; $\dot{w}=\dot{w}_0$. Система алгебраических уравнений (15) решается методом Гаусса. Полученные решения w_i используются для формирования и решения системы уравнений на втором шаге. Далее процесс повторяется требуемое число шагов по времени.

Описанный алгоритм применен к решению задач о распространении влаги по телу грунтовой плотины по времени при заполнении водохранилища до определенного уровня.

В качестве тестового примера рассмотрим задачу о распределении порового давления в глинистом ядре грунтовой плотины.

Поровое давление консолидации возникает в глинистых грунтах основания и теле земляных плотин в процессе их уплотнения под действием собственного веса вышележащего грунта, гидростатического давления и увлажнения верхового откоса.

Расчет порового давления производится при водонасыщении грунта со степенью $w \geq 0,85$ и коэффициентом фильтрации $k_f < (5-10) 10^{-6}$ см/с ($\approx 10^{-2}$ м/сут).

Нами выполнены аналогичные расчеты, как и в работе Сер-Понсона. Разработанная авторами методика расчета, заключается в выполнении следующих шагов: 1 – определяется поле распределения увлажнения грунтового объекта в различные моменты времени; 2 – корректируются параметры увлажненного грунта (его удельный вес с учетом насыщения жидкостью); 3 – решается статическая задача определения напряженного состояния исследуемой области (ядро плотины)

с учетом собственного веса, гидростатического давления и неоднородности грунта (за счет различной увлажненности участков плотины) в различные моменты времени от начала заполнения водохранилища. Поровое давление представляет собой среднearифметическое значение нормальных напряжений, действующих во взаимно-перпендикулярных направлениях.

При расчете были использованы следующие параметры: коэффициенты фильтрации по горизонтали $k_x=0,1\text{м/сутки}$, по вертикали $k_y=0,001\text{м/сутки}$. Геометрия исследуемого сооружения: высота 16,8м; коэффициенты откосов 0,4; ширина гребня 2м. Уровень заполнения водохранилища учитывался в двух вариантах: до уровня 0,75Н и при максимальном уровне заполнения. При этом при каждом уровне заполнения водохранилища поровое давление определялось при различном увлажнении – при увлажнении только левой части ядра и при полном увлажнении. По полученному увлажнению определялся удельный вес увлажненного грунта, увеличивающийся на величину проникающей в него жидкости:

$$\gamma=\gamma_0(1+w) \quad (18)$$

Затем находились компоненты напряжений в неравномерно увлажненном сооружении под воздействием гидростатического давления на верхний откос и с учетом полученного веса увлажненного грунта.

Таким образом, поставленная задача включала в себя решение двух задач: задачи влагопереноса и статической задачи теории упругости.

При решении тестовой задачи, как сказано выше, сначала решалась задача влагопереноса, т.е. определялось распределение изолиний увлажненности грунта при увлажнении левой части ядра, граничащей с верхним откосом. На рис.3 показано распределение изолиний увлажненности грунтового сооружения, находящегося в водоеме, заполненном на 0,75Н.

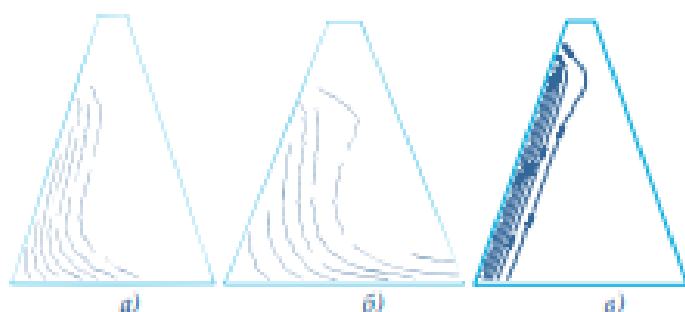


Рис.3. Распределение изолиний увлажненности в ядре плотины после установки уровня воды на высоте 0,75Н через а) 50 суток; б) 100 суток.

Причем рис.3а соответствует случаю, когда процесс влагопереноса затронул только половину (до оси симметрии) ядра, а на рис.3б показано распределение линий увлажненности по всему телу ядра. При этом временной интервал от начала

процесса в первом случае составлял 50 суток, а во втором – около 100 суток.

Характер полученных изолиний соответствует характеру распределения увлажненности в плотине с течением времени: область увлажненности, распространяющегося с заданной скоростью $k_x=0,1\text{м/сутки}$ от поверхности откоса, граничащего с водой. Здесь же на рис. 3в для сравнения приведены результаты распространения увлажненности в случае, когда основание представляет собой проникающую границу. Параллельно распространяющаяся влага проходит через поверхность основания далее в грунт (рис.3в), в то время как на непроникающей границе (рис.3а,б) сохраняемая влага служит источником распространения влаги вдоль основания.

По полученному в конкретное время увлажнению по формуле (18) определялся удельный вес грунта сооружения, и решалась статическая задача упругости для нахождения порового давления в соответствующее время при учете гидростатического давления, собственного веса и неравномерного увлажнения грунта. При этом уровень гидростатического давления, как было указано, рассматривался в двух вариантах: при заполнении водохранилища до высоты 0,75Н и при полном заполнении.

Для более точного количественного сравнения с результатами, известных работ, у авторов настоящей работы отсутствовали необходимые данные относительно геометрии области и коэффициентов фильтрации по горизонтали (γ нас $k_x=0,1\text{м/сутки}$) и по вертикали ($k_y=0,001\text{м/сутки}$). Тем не менее, полученные по предлагаемой методике результаты отражают картину распределения давления.

На рис.4 показаны изолинии вертикальных напряжений в ядре под действием только собственного веса. Значения напряжений на изолиниях указаны в таблице. Полученная картина распределения вертикального давления совпадает с приведенной на рисунке в [11] картиной распределения давления в теле ядра, полученной по расчету и в процессе замеров до заполнения водохранилища, только под действием собственного веса. Такое соответствие результатов также может служить доказательством справедливости получаемых решений.

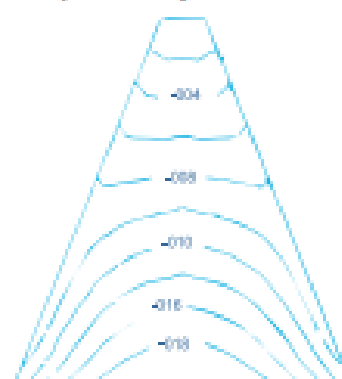


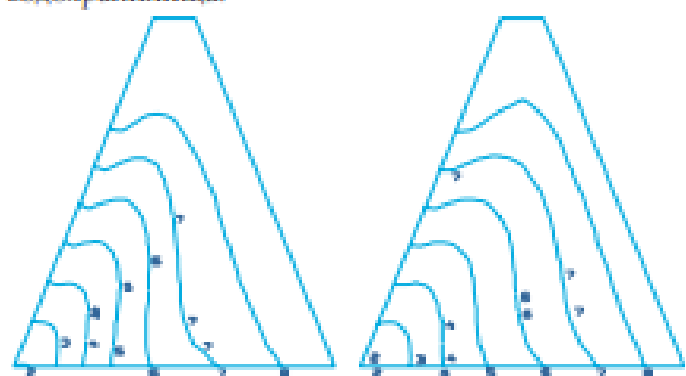
Рис.4. Вертикальные напряжения (МПа) в ядре под действием только собственного веса.

На рис.5 показано распределение порового давления в теле ядра при различной

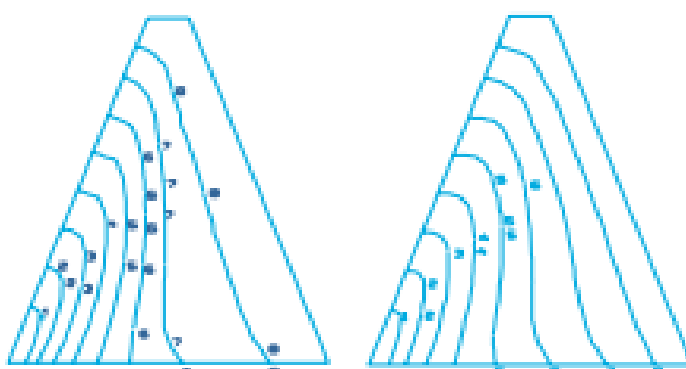
продолжительности увлажнения и различном уровне воды на верховом откосе. Значения давления на изолиниях указаны внизу под рисунком, где одинаковые индексы соответствуют одинаковым значениям давления на всех чертежах. Пояснения относительно уровня заполнения водохранилища (полное или на уровне 0,75Н) и продолжительности процесса увлажнения (увлажнение части или всего ядра) даны также на рисунке.

Результаты доказывают, что наибольшее поровое давление достигается внизу верхового откоса при максимальном заполнении водохранилища (рис.5в,г). Со временем поровое давление равномерно распространяется по всей области ядра, но его максимальная величина внизу верхового откоса остается неизменной.

Таким образом, решение представленной тестовой задачи и согласованность полученных результатов с данными [11], является доказательством справедливости разработанной методики расчета грунтовых гидротехнических сооружений, учитывающей фильтрацию жидкости, неоднородность увлажнения грунта при фильтрации, различный уровень наполнения водохранилища.



а) неполное увлажнение ядра при низком уровне воды (0,75Н),
б) полное увлажнение ядра при низком уровне воды (0,75Н)



в) неполное увлажнение ядра при высоком уровне воды
г) полное увлажнение ядра при высоком уровне воды
1) -0,13, 2) -0,14, 3) -0,087, 4) -0,081, 5) -0,065, 6) -0,048, 7) -0,032, 8) -0,016

Рис.5. Изолинии порового давления (в Мпа) в ядре плотины в зависимости от уровня заполнения водохранилища и времени процесса.

Разработанная методика основана на численном методе конечных элементов и последовательном решении этим методом задачи влагопереноса (фильтрация жидкости) и статической задачи теории упругости (определение НДС и порового давления в увлажненном грунте сооружения).

Список использованной литературы:

1. Salytova K. D. Non-stationary behavior of ground dams under the action of loads / K. D. Salytova, B. E. Klusakov // Transactions of academy of sciences of Azerbaijan. Series of physical-technical and mathematical sciences. Baku. – 2000. – Vol. XX. – №4. – PP. 244-250.
2. Абедев Ю. М. Основы проектирования и строительства на просадочных макротрещиных грунтах / Ю. М. Абедев, М. Ю.Абедев. – М.: Стройиздат, 1979. – 270 с.
3. Дадашев Н. А. Оценка величины упругих деформаций лессовых грунтов в зависимости от влажности / Н. А. Дадашев // В сб. Вопросы механики просадочных грунтов. – Баку, 1967. – С. 135-146.
4. Коренева Б. Г. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций. Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г.Коренева, А.Ф.Смирнова. – М.:Стройиздат, 1986. – 462 с.
5. Мирзаев А. Г. Об изменении напряженного состояния лессового грунта в процессе замачивания / А. Г. Мирзаев, З. Г. Тер-Мартиросян, И. И. Усманходжаев // Доклады АН УзССР. – 1984. – №7. – С. 19-22.
6. Мирзаев А. Я., Оценка косвенных ущербов при разработке деклараций безопасности гидротехнических сооружений / А. Я. Мирзаев, Т. П. Бухаринова, В. М. Иванов // Известия ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева. – 2003. – Т.242. – С. 34-40.
7. Мирсаидов М. Исследование напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений с учетом влажности и неупругих свойства грунта / М. Мирсаидов, П. Машкаримов, Т. Э. Султанов и др. // Современные проблемы и перспективы механики: материалы международной научно-технической конференции. 17-18 мая 2006 г., Ташкент / Ташкент, 2006. – С. 306-309.
8. Мирсаидов М. Оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с учетом упруго-пластических свойства материала сооружения и уровня заполнения воды / М. Мирсаидов, А. К. Каюмов, Д. Ф. Рузи и др. // Доклады АН РУз. – 2000. – №7. – С. 29-32.
9. Мустафаев А.А. Основы механики просадочных грунтов / А. А. Мустафаев. – М.: Стройиздат, 1978. – 263 с.
10. Мустафаев А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах / А. А. Мустафаев. – М.: Высшая школа, 1989. – 590 с.
11. Хусанов Б.Э. Модели деформирования лессового грунта при увлажнении.- 1. Одноосное деформирования / Б. Э. Хусанов // Узбекский журнал "Проблемы механики". – 2004. – №5-6. – С. 31-36.
12. Цибульчик Т.И. Определение порового давления в ядре высокой плотины при переменных значениях характеристик грунта / Т. И. Цибульчик // Труды ВОДГЕО. – 1965. – Вып.2. – С. 28-33.