

Салямова К.Д., д-р техн. наук, в.н.с.,

Руми Д.Ф., канд. техн. наук, с.н.с.

Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

## ТРАНСФОРМАЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ УВЛАЖНЕНИИ ГРУНТА

Klara\_51@mail.ru

Решена краевая задача статической теории упругости о напряженно-деформированном состоянии (НДС) основания массивного сооружения. Расчетная модель системы представляется штампом на грунтовом основании. Последовательно решена задача влагопереноса и по полученному неравномерному полю увлажнения определяется НДС грунтового основания и просадка самого сооружения. Рассматриваются различные расположения источников увлажнения, включая подъем грунтовых вод, паводок и локальное увлажнение, вызванное повреждением систем водоснабжения.

**Ключевые слова:** основание, увлажнение грунта, просадочность, деформация, численные методы, метод конечных элементов.

**Введение.** Безопасность зданий и сооружений, находящихся в условиях повышенной сейсмичности региона [1–6], обычно связана с деформированием приконтактных слоев, вызванных просадкой в результате увлажнения лессового основания, занимающие большую территорию Узбекистана. В нормах проектирования сооружений в сейсмических районах [7–8] традиционно основное внимание уделяется оценке напряженно-деформированного состояния самого сооружения. При этом практически без внимания остаются проблемы деформации основания в результате равномерного или неравномерного увлажнения. Хотя именно посредством контакта с подстилающим основанием на сооружение передаются сейсмические нагрузки и именно деформация основания в результате неравномерного увлажнения инициирует его неравномерную осадку и разрушение самого сооружения.

Лессовые грунты, реагируют на климатические факторы: увлажнение, засуху, повышение уровня подземных вод, накопление дополнительной влаги под сооружением при повреждении системы водоснабжения и пр. Указанные факторы приводят к подъему или просадке расположенных на них фундаментов, влияя на прочность основания и устойчивость сооружения.

Поэтому учет увлажнения грунта основания, изменяющего физико-механические характеристики приконтактного слоя в системе «со-

оружение – грунт» представляется актуальным особенно для подпорных сооружений. Решению задачи о трансформации НДС грунта под фундаментом сооружения при различном характере увлажнения посвящена предлагаемая работа.

Для решения задач о распространении влаги и влиянии увлажнения грунта на просадку фундамента выбран численный метод конечных элементов [9]. Разработаны программы, реализующие метод Ньюмарка [10] для решения системы дифференциальных уравнений в задачах о влагопереносе и метод Гаусса для решения системы алгебраических уравнений в задаче о напряженно-деформированном состоянии неравномерно увлажненного основания под сооружением. В дальнейшем разработанная методика будет использована при расчете динамического поведения конкретных плотин, находящихся на постоянно увлажняющемся грунте [11].

**Постановка задачи.** Для решения поставленной задачи выбрана плоская модель системы «основание – сооружение» (рис.1), при этом сооружение представлено жестким штампом, а подстилающее основание предполагается неравномерно увлажненным. Плотность грунта в той или иной области основания меняется в зависимости от степени увлажнения, выражаемой коэффициентом  $w$  ( $0 < w < 0,38$ )

$$\rho = 0,00176 + 0,001w \quad (1)$$

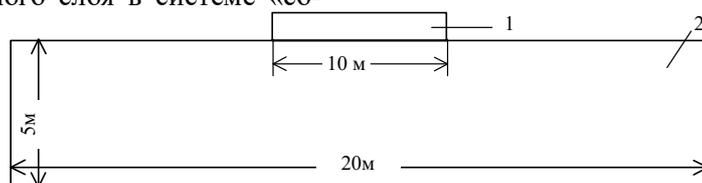


Рис.1. Плоская модель системы «основание – сооружение»:

1 – жесткий штамп; 2 – грунтовое основание

Увлажнение грунта приводит к трансформации напряженно-деформированного состоя-

ния основания, вызывая с течением времени деформацию фундамента и разрушение сооружения.

Для исследования процесса трансформации НДС основания необходимо, в первую очередь, исследовать процесс распространения влаги. И уже затем, по полученному полю увлажнения определить напряженно-деформированное состояние основания с находящимся на нем сооружением.

Значительное различие в скоростях распространения влаги в грунте (1÷2 м/сутки) и скорости распространения поверхностных волн в лесовом грунте (~100м/сек) позволяют рассматривать эти два процесса раздельно, т.е. сначала определить поле распределения влаги в грунте (задача фильтрации) и затем исследовать НДС увлажненного грунтового массива (задача упругости) в любой (от начала увлажнения) момент времени. Обе задачи решаются методом конечных элементов (МКЭ) [9,10]. При этом в задаче упругости с каждой точкой пространства связано 2 неизвестных узловых перемещения, в задаче фильтрации участвует только одна неизвестная скалярная величина ( $w$ ), определяющая степень увлажненности точки среды.

Процесс фильтрации влаги сквозь грунтовую среду описывается квазигармоническим уравнением [9]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \mu \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

где  $w(t, x, y)$  – подлежащая определению функция увлажнения;  $k_x, k_y$  – заданные коэффициенты фильтрации: изотропного ( $k_x=k_y$ ) или анизо-

тропного ( $k_x \neq k_y$ ) грунтового массива. В наших расчетах коэффициенты фильтрации по осям приняты равными –  $k_x=k_y=2$  м/сутки.

Граничные условия на поверхности  $S_0$ , где происходит постоянное замачивание, задаются максимальным значением функции увлажненности  $w$ :

$$w_{S_0} = w_{\max} = 0.38 \quad (3)$$

Остальные части границы области предполагаются проницаемыми, т.е. влага распространяется не только внутри, но и за пределами выбранной области основания.

Уравнение (1) вместе с граничными (2) и начальными  $w_0=w_{t=0}$  условиями однозначно определяет решение задачи на определенном интервале времени.

Конечно-элементная дискретизация рассматриваемой задачи получается в результате разбиения рассматриваемой области на конечные элементы треугольной формы с линейной аппроксимацией функции увлажнения внутри элемента

$$w = (a + bx + cy) / 2s \quad (4)$$

и тогда нестационарная задача о распределении влаги по всей области при максимальном увлажнении части поверхности приводится к системе дифференциальных уравнений

$$[C] \frac{\partial}{\partial t} \{w\} + [H] \{w\} = 0 \quad (5)$$

где  $[H]$  – матрица проводимости – результат объединения элементарных матриц  $[h]^e$  вида [11–14]:

$$[h]^e = \frac{k_x}{4s} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_m \\ & b_j b_j & b_j b_m \\ & & b_m b_m \end{bmatrix} + \frac{k_y}{4s} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_m \\ & c_j c_j & c_j c_m \\ & & c_m c_m \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а матрица  $[C]$  – объединение матриц  $[c]^e$ :

$$[c]^e = \frac{\mu s}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Решение системы (5) осуществляется пошаговым методом Ньюмарка [10] и представляет поле увлажнения области в зависимости от времени.

Определив увлажнение в каждом элементе рассматриваемой области под фундаментом, далее решается задача упругости для грунтового

основания с учетом измененной плотности увлажненного грунта (1).

*Постановка и решение задачи о напряженно-деформированном состоянии основания под фундаментом жесткого сооружения.*

При решении плоской задачи о напряженно-деформированном состоянии при различном характере увлажнения основания учитывается собственный вес элементов системы. Поставленная статическая задача решается методом конечных элементов, в основе которого – вариационный принцип возможных перемещений:

$$\delta A = - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_S \sigma_{ij} v_j \delta u_i dS + \int_V \rho g \delta v dV = 0 \quad (8)$$

Здесь каждое из слагаемых представляет работу: сил упругости (первый интеграл), внешних поверхностных сил на горизонтальных перемещениях  $\delta u_i$  (второй); массовых сил ( $\rho g$ ) на вертикальных перемещениях  $\delta v$  (третий);  $v$  - вектор нормали к участку поверхности.

Граничные условия на боковых гранях основания (скользящая заделка) выражают равенство нулю работ сил, перпендикулярных поверхности -

$$\sigma_{ij} v_j \delta u_i = 0 \quad (9)$$

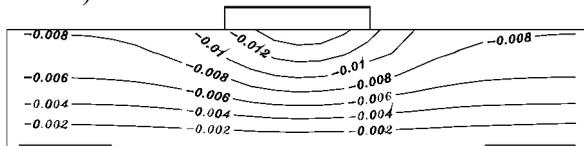
Горизонтальные участки границы по условию задачи - свободны от нагрузки:

$$\sigma_{ij} v_j = 0 \quad (10)$$

С учетом (9) и (10) второй интеграл в (8) получается нулевым.

В ходе конечно-элементной процедуры получаем алгебраическую систему уравнений

а)



б)

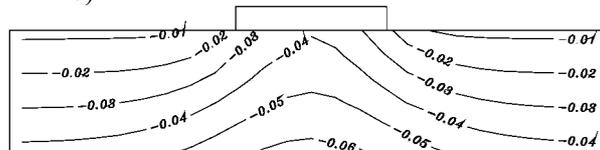


Рис. 2. Изолинии вертикальных перемещений, [м] – (а) и напряжений, [МПа] – (б) в изотропном неувлажненном основании

Эти результаты являются исходными для сравнения с результатами последующих расчетов, выполненных при увлажненном основании.

Изолинии значительно искривлены, особенно, в приконтактной области в непосредственной близости к фундаменту сооружения. На удалении от фундамента их кривизна уменьшается. Наибольшие вертикальные напряжения в нижней центральной части области равны  $\sigma_y = 0,07 \text{ МПа}$  и соответствуют напряжениям, определенным по формуле механике грунтов:

$$\sigma_y = \rho g H + \gamma = 0,00176 \times 9,8 + 0,02 \approx 0,07 \text{ МПа},$$

что свидетельствует о достоверности получаемых результатов [14–15].

Следующие результаты получены уже с учетом неравномерного увлажнения основания, меняющего характер деформированного состояния области под штампом.

*Исследование деформированного состояния увлажненных оснований под жестким фунда-*

$$[K] \{q\} = \{R\}, \quad (11)$$

где  $\{q\}$  – искомые перемещения узловых точек,  $[K]$  – общая матрица жесткости, учитывающая неоднородность физико-механических параметров массива, приобретенную при неоднородном увлажнении области;  $\{R\}$  – вектор узловой нагрузки от собственного веса.

Алгебраическая система (11) решается методом Гаусса.

На рис.2 представлены линии вертикальных перемещений и вертикальных напряжений в изотропном приконтактном слое под массивным сооружением. Здесь основание не увлажнено, плотность при сухом грунте ( $w=0$ )  $\rho=0,00176$ . Размеры приконтактной зоны приняты  $L=20\text{м}$ ;  $h=5\text{м}$ . Сооружение представлено нагрузкой, интенсивность которой составляет  $\gamma=0,02 \text{ МН/м}$ . Значения полученных параметров указаны на соответствующих изолиниях.

*ментом здания.*

Решение поставленной задачи осуществляется поэтапно. Сначала определяются увлажненность основания по вышеуказанному алгоритму. Результаты решения задачи о влагопереносе подтверждены сравнением решения тестовой задачи. Затем по полученной увлажненности  $w$  определяется плотность грунта (1) и формируется система алгебраических уравнений (11) для решения статической задачи о напряженно-деформированном состоянии системы.

Было рассмотрено несколько вариантов увлажнения: 1 – увлажнение центральной части фундамента, 2 – локальное увлажнение левой части фундамента; 3 – увлажнение поверхности основания (паводок); 4 – увлажнение нижней части основания (подъем грунтовых вод). Варианты расчетов построчно представлены на рис.3, где в левом столбце дано распределение увлажненности, в правом – вертикальные смещения, [м].

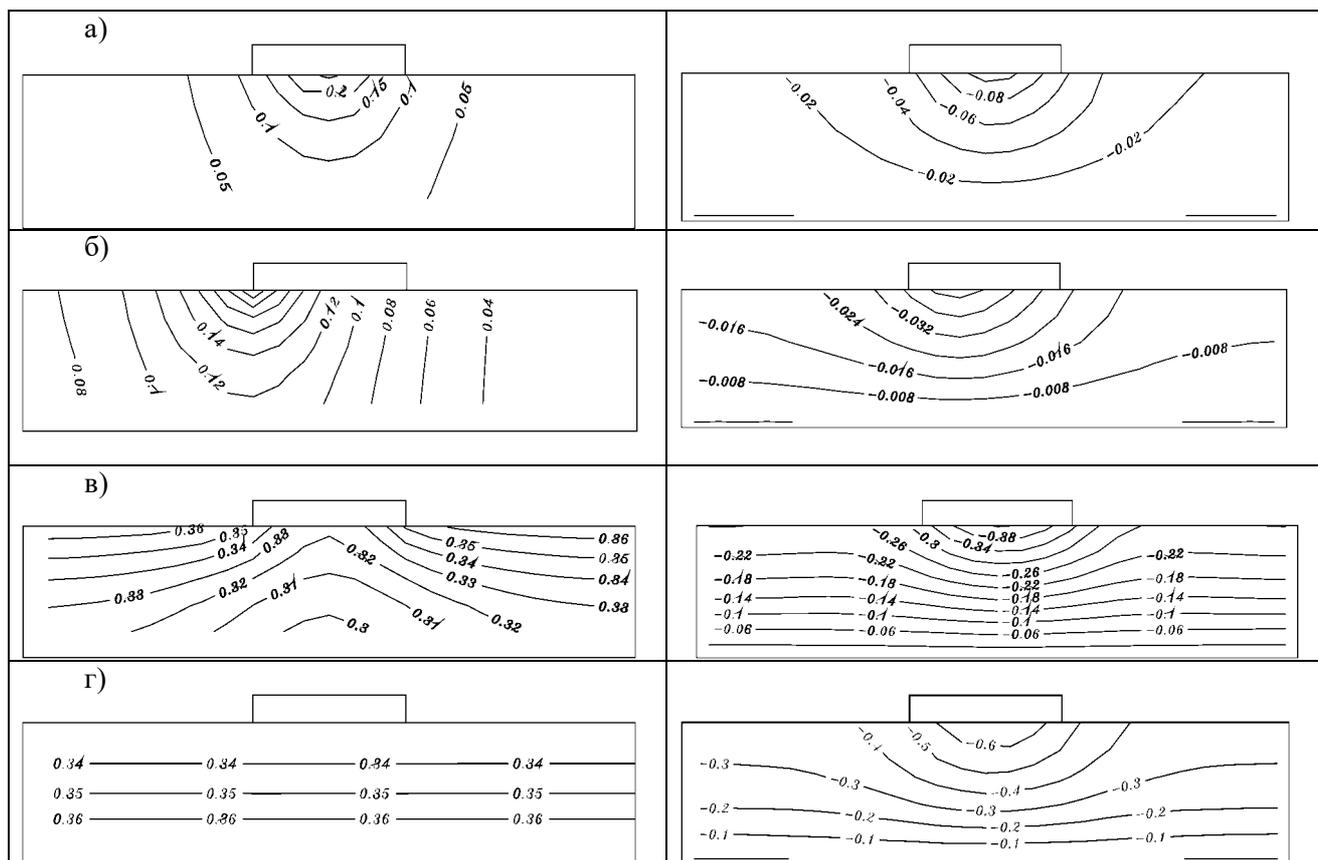


Рис. 3. Изолинии увлажнения (слева) и вертикальных перемещений (справа) в основании: а – источник в центре фундамента; б – в левом конце фундамента; в – при паводке; г – при подъеме грунтовых вод

Сравнивая полученные результаты (рис. 3) с решением при неувлажненном грунте (рис. 2), можно увидеть значительное увеличение смещений увлажненного основания непосредственно под сооружением (до 0,1м рис. 3 а). Указанные изменения касаются только той части основания, которая расположена под фундаментом, остальная часть основания остается практически без изменения. Это объясняется локальным увлажнением только центральной части грунтового массива.

При несимметричном относительно фундамента увлажнении основания (рис. 3 б) увлажняемая левая часть смещается на глубину 0,05м. Таким образом, несимметричное относительно фундамента увлажнение приводит к наклону сооружения.

В случае паводка (рис. 3 в), когда увлажня-

ется вся свободная поверхность, возможна значительная осадка сооружения.

При продолжительном подъеме грунтовых вод (рис. 3 г) увлажнение равномерно распределяется по основанию и значительно – до 0,6 м – увеличивается осадка сооружения (рис. 3 г).

Таким образом, при постоянной массе сооружения величина его просадки зависит от характера увлажненности грунтового основания.

Увлажненность основания связана с продолжительностью замачивания. Приведенные выше результаты были получены через сутки после начала увлажнения, на рис. 4 приведены результаты распределения поля увлажненности (а) и просадки основания (б) через 30 дней увлажнения с центрально расположенным под фундаментом источником.

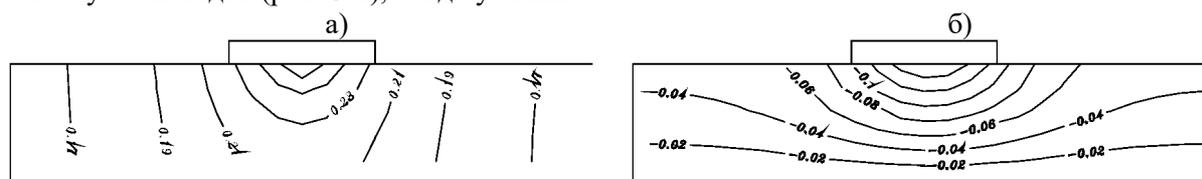
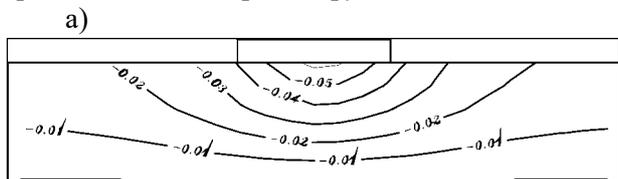


Рис. 4. Изолинии увлажнения (а) и вертикальных перемещений (б) основания при 30-дневном увлажнении центральной части фундамента

Анализ результатов показывает, что продолжительное увлажнение основания увеличи-

вает просадку фундамента. На это указывают линии с одинаковым индексом в правой колонке

рис. 3. Например, изолиния с индексом 0.1, означающая область основания с вертикальным смещением 10 см на рис. 3 а (справа), при увлажнении продолжительностью 1 день, находится непосредственно в центре под фундаментом. С течением времени эта изолиния, расширяясь, достигает границ фундамента.



Изменение деформированного состояния связано также и с массой сооружения. На следующих рисунках показаны изолинии вертикальных напряжений в зависимости от массы сооружения:  $M=0,25M_0$  (рис. 5) и  $M=0,5M_0$  (рис.6), где  $M_0$  – масса сооружения в предыдущих расчетах.

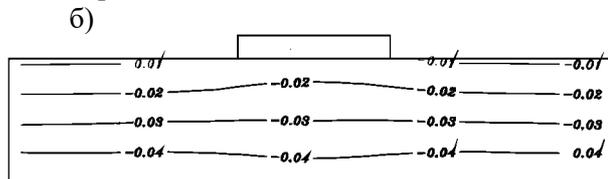


Рис. 5. Изолинии вертикальных перемещений (а) и напряжений (б) в приконтактной области при увлажнении центральной части фундамента. Масса сооружения –  $M=0,25M_0$

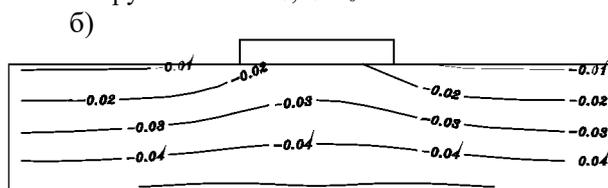
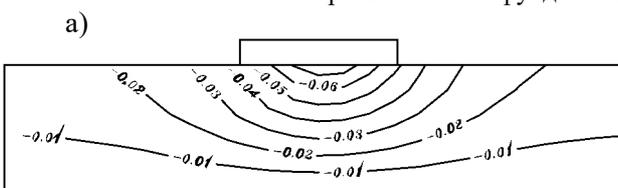


Рис. 6. Изолинии вертикальных перемещений (а) и напряжений (б) в приконтактной области при увлажнении центральной части фундамента. Масса сооружения –  $M=0,5M_0$

Вертикальные напряжения в основании под сооружением определяются с глубиной  $h$  по формуле:

$$\sigma_y = \rho gh + \gamma, \quad (12)$$

где  $\rho$  – плотность грунта;  $\gamma$  – интенсивность распределенной нагрузки от сооружения.

Характер распределения напряжений зависит от соотношения слагаемых в формуле (12). При малом значении  $\gamma$ , характер расчетных напряжений определяется изменением плотности грунта при увлажнении. Такой случай представлен на рис. 4 б, где величина вертикальных напряжений линейно увеличивается почти сразу под сооружением. С увеличением массы сооружения (рис. 5 б) линейное изменение напряжений наблюдается только на большей глубине, вблизи же основания характер напряжений нелинейный, а это значит, что происходит неравномерное проседание сооружения. Таким образом, толщина приконтактной зоны зависит от увлажненности основания и массы находящегося на ней сооружения. И тот и другой фактор увеличивают толщину приконтактной зоны.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют картину напряженно-деформированного состояния, формирующуюся в течение времени в грунтовом массиве, находящемся под действием гравитационных сил и увлажнения. При этом расположение источника увлажнения относительно фундамента наземного сооружения может быть выбрано произвольно.

На основании исследований напряженно-

деформированного состояния приконтактной зоны системы «основание – сооружение» при статическом нагружении с учетом неравномерного увлажнения грунтового массива можно сделать следующие **выводы**:

1. Разработана методика и решены задачи о распространении влаги от локального и распределенного по поверхности источника увлажнения в грунтовом основании и определено напряженно – деформированное состояние оснований при различном характере увлажнения.

2. При определении толщины приконтактной области используется критерий, учитывающий характер распределения изолиний вертикальных напряжений в основании под сооружением, полученных при решении статических и квазистатических задач о НДС и увлажнении грунтового массива. Согласно предлагаемому критерию, толщина приконтактной зоны с нелинейным характером изолиний перемещений зависит от времени увлажнения и массы находящегося на ней сооружения. И тот и другой фактор увеличивает толщину приконтактной зоны.

3. Разработанный подход к анализу напряженно-деформированного состояния системы «сооружение – основание» может быть использован для анализа и прогнозирования надежности и устойчивости массивных наземных сооружений и подстилающего грунта при увлажнении, вызванным паводком, подъемом грунтовых вод или повреждением дренажной системы и системы водоснабжения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саямова К.Д. Основные аспекты по без-

опасной и надежной эксплуатации гидротехнических сооружений в сейсмических районах Республики // Узбекский журнал «Проблемы механики». 2015. № 1. С.84–86.

2. 14 th word conference on earthquake engineering: мат-лы XIV Всемирной конф. по сейсмостойкому строительству, касающихся описания повреждений и разрушений плотин в различных регионах мира. Пекин, 2008.

3. Rashidov T.R., Kondratiev V.A., Akmedov M.A., Turhin A.I., Strategy of reduction of seismic risk for hydro-technical structures // Proceeding of the international conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering. Tokyo. 2009. h.975-981.

4. Саямова К.Д., Руми Д.Ф. Влияние трещиноватого участка грунта основания на деформацию грунтовой плотины // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире: мат-лы 9-ой Междунар. научно-практ. конф. «Геориск-2015». 2015. Т.1. С.359-363.

5. Саямова К.Д., Руми Д.Ф. Динамика грунтовых плотин: монография. LAMBERT Academic publication GmbH & Co. KG, Germany. 2015. 150 p.

6. Ахмедов М.А., Саямова К.Д. Анализ и оценка повреждений гидротехнических сооружений: монография. Ташкент: Фан ва Таракиети. 2016. 156 с.

7. ШНК 2.06.11-04 Строительство в сейсмических районах. Гидротехнические соору-

жения // Госсархитекстрой республики Узбекистан. 2004. 50с.

8. СНиП Плотины из грунтовых материалов. (СНиП 2.06.05-84\*) Госстрой СССР. М. 1991. 64с.

9. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542с.

10. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1985. 392с.

11. Хусанов Б.Э. Релаксационные модели сдвигового деформирования структурно-неустойчивой грунтовой среды // Узбекский журнал «Проблемы механики». 2002. № 6. С.13–18.

12. Султанов К.С., Хусанов Б.Э. Уравнения состояния просадочных грунтов с учетом увлажнения // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2001. №3. С. 7–11.

13. Тер-Мартirosян З.Г., Ядгаров З.Х., Мирзаев А.Г. Прогноз оседания поверхности массива лессового грунта при увлажнении методом влагоупругости // В кн.: Однофазное и многофазное течение жидких сред. Ташкент. 1982. С.28-33.

14. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: Стройиздат. 1991. 119 с.

15. Вабищев П.Н., Данияров А.О., Пулатов А.А. Численное моделирование увлажнения грунта // Математическое моделирование. 1991. Т.3. С.3–9.

**Salyamova K.D., Rumi D.F.**

#### **TRANSFORMATION OF STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURE FOUNDATION UNDER NON-UNIFORM MOISTURING OF SOIL**

*A boundary problem of static theory of elasticity on stress-strain state (SSS) of a massive structure foundation is solved. Design model of the system is presented as a stamp on earth basement. The problem of moisture transfer is successively solved, and on the basis of obtained non-uniform field of moistening, the SSS of earth basement and the settlement of the structure itself are determined. Various locations of the moisture sources, including the rise of groundwater, flooding and local wetting caused by the damage of water supply systems are considered.*

**Key words:** *foundations, soil moisture content, settlement, strain, numeric methods, Finite Element Method.*

**Саямова Клара Джаббаровна**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз.

Адрес: Узбекистан, Ташкент 100125 ул. Дурмон йули 31 институт сейсмостойкости сооружений.

E-mail: Klara\_51@mail.ru

**Руми Динара Фуадовна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз.

Адрес: Узбекистан, Ташкент 100125 ул. Дурмон йули 31 институт сейсмостойкости сооружений.