

DOI: 10.12737/23817

Салямова К.Д., д-р техн. наук, проф.,
Руми Д.Ф., канд. техн. наук, ст. н. с.
Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ВЛАЖНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ИЗ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

klara_51@mail.ru

Приведена постановка задачи по определению напряженно-деформированного состояния подпорного гидротехнического сооружения при основных нагрузках - силы гравитации, гидростатическое давление, увлажнение грунта. Задача решена в плоской упругой постановке с применением метода конечных элементов. Результатом решения задач явились смещения, напряжения и деформации в грунтовой плотине. В качестве примера рассмотрена грунтовая плотина Резаксайского водохранилища в Республике Узбекистан. Сделан ряд выводов, связанных с конструкцией сооружения, а также выявлено влияние физико-механических свойств грунта (местный грунтовый материал) на напряженно-деформированное состояние.

Ключевые слова: грунтовая плотина, силы гравитации, метод конечных элементов, напряжение, деформация, смещение, увлажнение.

Введение. Задачи безопасности и надежной эксплуатации подпорных гидротехнических сооружений требуют постоянного совершенствования методов их расчета на различного рода статические и динамические нагрузки [1–4]. Применяемые в настоящее время нормативные методы расчета указанных сооружений [5–7] не позволяют учесть конструктивные особенности самого сооружения, реальные неоднородные физико-механические характеристики грунтов, слагающих тело сооружения, а также последствия заполнения и опорожнения водохранилища. Предлагаемая методика решения задач о НДС позволяет учесть эти недостатки, а также спрогнозировать возможные повреждения, которые также могут сыграть негативную роль при динамических (сейсмических) воздействиях [1, 2, 8].

Методология. Исследование влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтовой плотины ее конструктивной схемы (высота, откосы призм и ядра и т.п.), при основных нагрузках проводится на примере эксплуатируемого гидротехнического сооружения (Резаксайское водохранилище). Разработана методика и комплекс прикладных программ для численного расчета смещений, напряжений, деформаций в теле грунтового гидротехнического сооружения при основных нагрузках. Задача решается численно -методом конечных элементов.

Основная часть. Математическая постановка статической задачи о НДС грунтового сооружения (плоско-деформируемая модель сооружения, упругая модель грунта) включает:

1) - вариационный принцип минимума полной

энергии системы:

$$\delta\Pi - \delta W = 0 \quad (1)$$

где $\delta\Pi$ – приращение потенциальной энергии системы; δW – работа внешних сил на возможных перемещениях;

2) – уравнение состояния, выражающее зависимость между компонентами напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} для упругой среды (закон Гука)

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

3) – соотношения Коши, связывающие деформации с перемещениями

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

4) – граничные условия на жестком основании, означающие отсутствие возможных перемещений $\delta \bar{u}$:

$$\delta \bar{u} = 0 \quad (4)$$

5) – внешнее воздействие представляется объемными силами – P (весом), приложенными по всему объему сооружения, и поверхностными силами \bar{f} , действующими на части поверхности сооружения и являющиеся, по существу, гидростатическим давлением.

Здесь $\bar{u} = \{u_i, u_j\}$ – горизонтальные и вертикальные перемещения точки тела с координатами $\{x_i, x_j\}$; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – компоненты тензора напряжений и деформаций; λ, μ – константы

Ламе.

Использование МКЭ позволяет свести поставленную задачу (1)–(4) к системе алгебраических уравнений [3], в результате решения которой методом Гаусса определяется перемещения, затем (формулы Коши) – деформации и, наконец (закон Гука) – напряженно-деформированное состояние грунтовой плотины при учитываемых нагрузках

Такая задача решена на примере плотины Резаксайского водохранилища, расположенной в долине Резакса (приток р. Сырдарья) Чустского района Наманганской области Узбекистана. Плотина, создающая водохранилище, выполнена глухой земляной насыпью с наклонным ядром из супесчано-суглинистого грунта и упорными призмами из гравийно-галечных грунтов. Максимальная высота плотины в русловой части составляет 80 м, длина по гребню 3323 м, наибольший подъем уровня водохранилища

77 м.

Упорные призмы плотины отсыпаны из гравийно-галечных грунтов с песчаным заполнением и укаткой по плотности сухого грунта $\rho=2,1 \text{ т/м}^3$. Заложение откосов плотины определено расчетами и составляют для верхового откоса $m_1=2,5$, для низового - $m_2=1,9$.

Наклонное ядро выполнено из смеси суглинка и супеси с укаткой до плотности сухого грунта $\rho=1,7 \text{ т/м}^3$. Основанием ядра по всей длине плотины является массив алевролитов и песчаников, перекрытый слоями грунта различной толщины, состоящими из галечников, суглинков и супеси.

Рассматривается влияние конструктивной неоднородности на напряженно-деформированное состояние грунтовой плотины Резаксайского в/х.

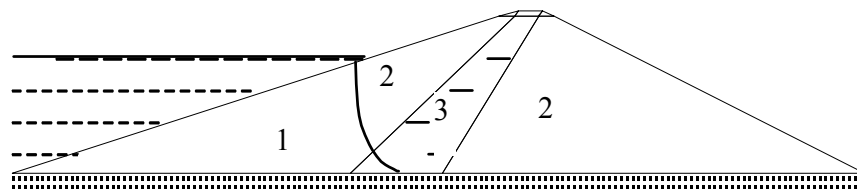


Рис. 1. Расчетная схема грунтовой плотины:

1 – область увлажненного грунта ниже кривой депрессии; 2 – области неувлажненного грунта;
3 – ядро плотины

1. Решение задачи о НДС неоднородной грунтовой Резаксайской плотины с учетом собственного веса, гидростатического давления и увлажнения грунта

Задача решена для неоднородной реальной плотины (с ядром) под собственным весом, с учетом гидростатического давления воды и увлажнения грунта при максимальном уровне заполнения водохранилища, составляющем 77 м. Для выбора физико-механических параметров увлажненных гравийно-галечниковых грунтов использовались данные по механике грунтов [9, 10], согласно которым плотность грунтовой массы с 10%-ым увлажнением составляет $\rho=2,2 \text{ тс/м}^3$. С учетом скорости распространения продольных волн в таком грунте ($v=1 \text{ км/сек}$), получим для модуля Юнга величину $E=2200 \text{ МПа}$. Полученные компоненты напряженно-деформированного состояния неоднородной плотины с учетом веса, увлажнения и гидростатического давления показаны на рис. 2.

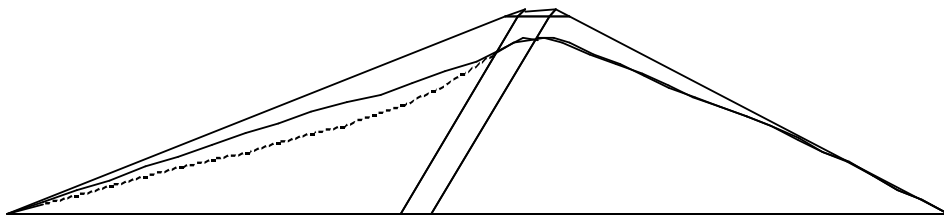
Увлажнение грунта верховой призмы плотины приводит к увеличению ее массы и, соответственно, к увеличению вертикальной составляющей нагрузки и вертикальных составляющих смещения верхнего откоса (рис.2а). При

этом увеличивается крутизна пригребневой зоны, что указывает на возможное здесь обрушение грунта.

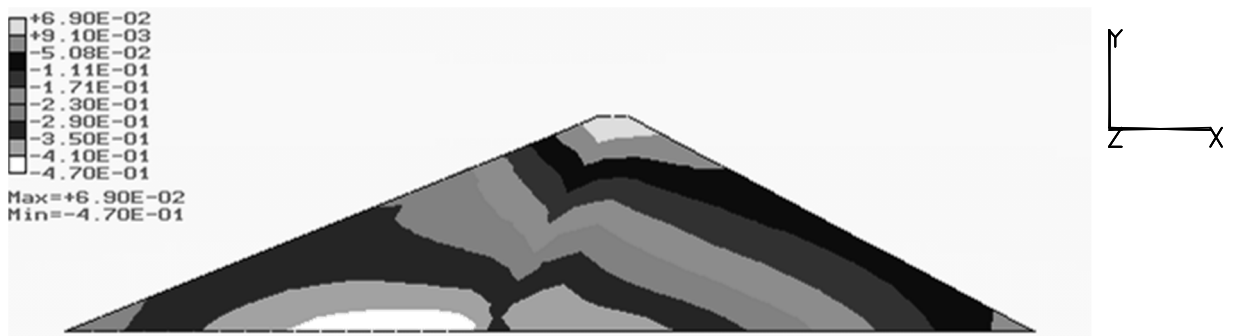
При экстренном сбросе воды, с уменьшением уровня гидростатического давления, но с учетом увлажнения грунта ниже первоначального уровня кривой депрессии, правомерна постановка задачи о деформировании верхового откоса. Для этого сравним результаты расчета горизонтальных перемещений верхового откоса, полученные для плотины с увлажненным грунтом с учетом и без учета гидростатического давления. На рис.4 показано распределение горизонтальных перемещений и деформации верхового откоса в обоих случаях.

Анализ полученных результатов для деформации неоднородной плотины с увлажнением верховой призмы показывает, что уменьшение уровня гидростатического давления при экстренном сбросе воды приводит к выпору грунта, т.е. смещению всей массы грунта верховой призмы в направлении к верхнему бьефу (штриховая линия на рис.3в). При воздействии же гидростатического давления линия откоса становится более искривленной, так как находящаяся под водой центральная часть откоса,

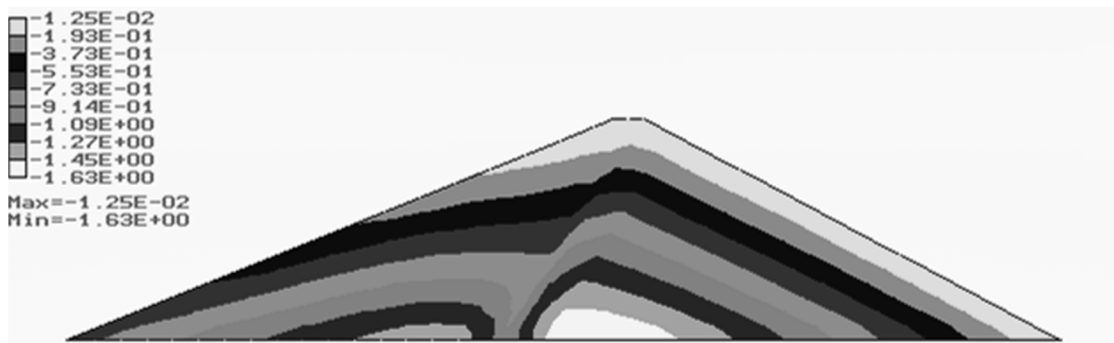
горизонтальные напряжения в направлении xy (рис. 2б). В результате чего увеличивается чис-



б) горизонтальные напряжения [МПа]: $\max/\sigma_x=0,47$



в) вертикальные напряжения [МПа]: $\max/\sigma_y=1,63$



д) касательные напряжения [МПа]

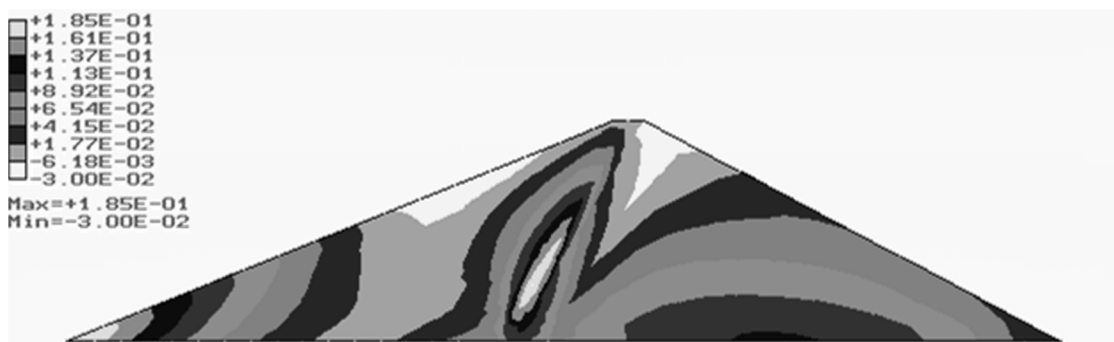


Рис. 2. НДС Резаксайской плотины под действием собственного веса, гидростатики и увлажненном грунте верхней призмы

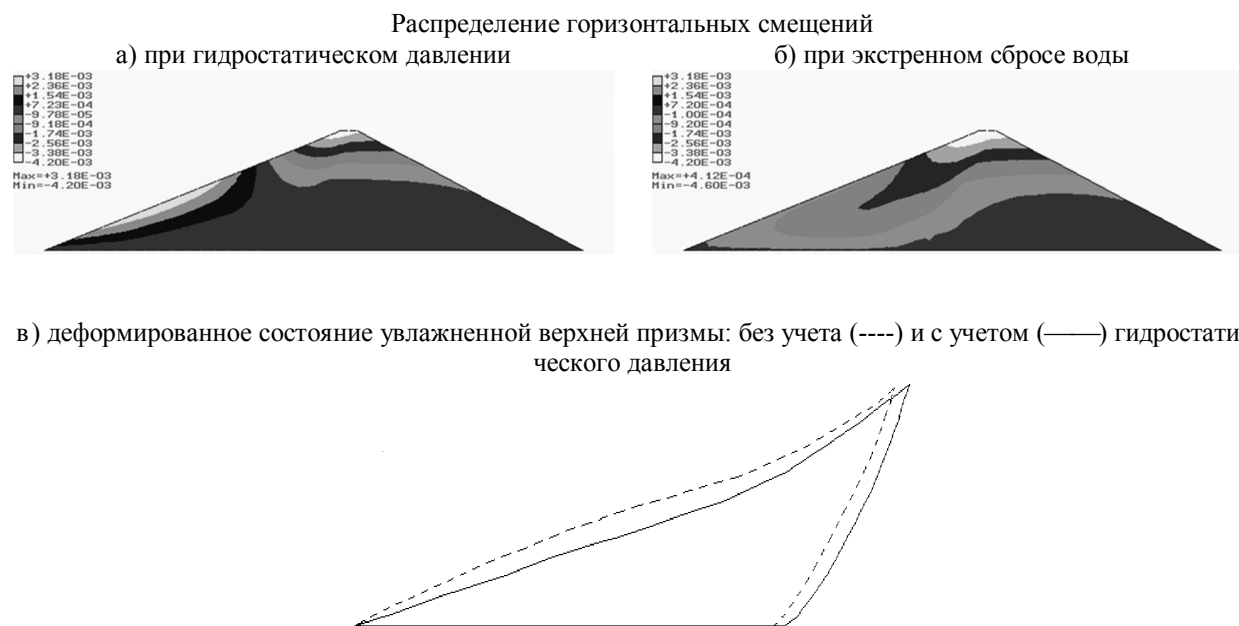


Рис.3. Изменение горизонтальных смещений плотины (а, б) и деформаций увлажненного верхнего откоса (в) в отсутствии и при наличии гидростатического давления.

Таким образом, переувлажнение верхнего откоса при гидростатическом давлении может вызвать обрушение грунта в пригребневой зоне верхнего откоса, тогда как при резком сбросе воды внизу откоса возможен выпор грунта.

2. Исследование процесса размыва поверхности плотины как следствие неустановившихся фильтрационных потоков, возникающих в теле плотины при резком снижении уровня воды в верхнем бьефе.

Рассмотрим грунт плотины как двухфазную среду, состоящую из твердого скелета (собственно грунта) и поровой жидкости, и находящуюся под воздействием фильтрационных потоков.

При снижении воды в водохранилище на частицу грунта, находящуюся ниже кривой депрессии в зоне фильтрационного потока, направленного в сторону верхнего откоса, будет действовать равнодействующая сила, стремящаяся сдвинуть с места рассматриваемый элементарный объем грунта V . Эта равнодействующая (рис.4) состоит из фильтрационной силы

$$f_{\phi} = \gamma_{\epsilon} i, \tag{6}$$

направленной вдоль линии тока, и направленной вертикально вниз удельного веса грунта, взвешенного в воде (Архимедова сила):

$$\gamma_{\epsilon\epsilon} = \gamma_{\text{сух}} - (1-n) \gamma_{\epsilon} \tag{7}$$

Здесь i - пьезометрический уклон (величина, обратная градиенту напора) в данной точке, определяемый на основе данных теории филь-

трации; γ_{ϵ} – удельный вес воды; n – пористость грунта; $\gamma_{\text{сух}}$ – удельный вес сухого грунта.

Таким образом, грунт, насыщенный движущейся водой в области фильтрационного потока следует рассматривать как взвешенный с удельным весом $\gamma_{\epsilon\epsilon}$, находящийся под действием приложенной в направлении скорости фильтрации силы f_{ϕ} . Равнодействующая этих сил, направленная под углом θ_0 к вертикали, вызывает направленное движение частиц грунта из тела плотины на поверхность (рис.4).

При снижении уровня воды в верхнем бьефе в теле верхнего откоса зарождается неустановившаяся фильтрация. Удельная фильтрационная сила f_{ϕ} (рис.4), будучи геометрически сложена с силой удельного веса взвешенного грунта $\gamma_{\epsilon\epsilon}$, дает результирующую удельную силу γ_0 , получаемую по правилу сложения векторов. Направление этой силы образует с $\gamma_{\epsilon\epsilon}$ угол θ_0 , а ее величина вследствие малости скорости фильтрации практически равна по величине $\gamma_{\epsilon\epsilon}$. Эффект фильтрации проявляется здесь в том, что направление сил, действующих на грунт, изменяется: эти силы оказываются не вертикальными (как в случае сухого грунта), а наклонными, так как к вертикальной силе (весу) добавляется сила, направленная по касательной к потоку фильтрации. Равнодействующая этих двух сил наклонена на угол θ_0 от вертикали и направлена вниз и в сторону водохранилища. Таким образом, фильтрация создает дополнительный момент, стремящийся повернуть откос

в направлении увеличения угла заложения откоса.

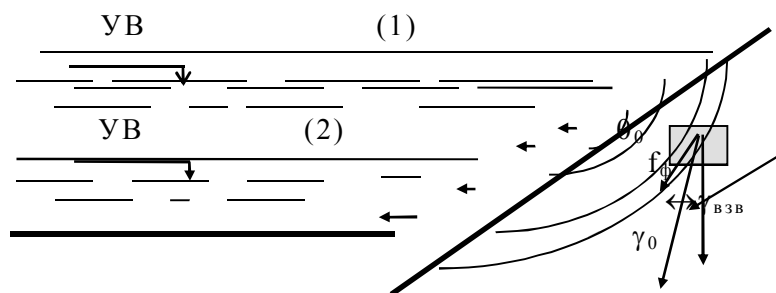


Рис. 4. Фильтрационные потоки у поверхности откосов

Таким образом, эффект действия фильтрационных сил при резком снижении уровня воды в верхнем бьефе эквивалентен эффекту увеличения угла θ - угла наклона откоса к горизонту. Однако следует иметь в виду, что грунт плотный, в зависимости от его свойств, среди которых большое влияние имеет влажность, может удерживать крутой откос только определенной высоты.

Когда значение высоты превосходит критическую отметку, в верхней части плотины отмечается, как правило, крутая стенка. При подмыве ее непосредственно над урезом воды образуется крутой уступ, который обрушается в виде осыпи, обвала или оползня, уменьшая ширину гребня. При этом нижняя часть откоса приобретает более пологий уклон. В результате многократных процессов размыва верховой откос приобретает все более пологие очертания. При этом уменьшается и угол верхового откоса и ширина гребня плотины.

Многократное чередование процесса повышения и резкого сброса уровня воды в верхнем бьефе, наблюдаемое во время волнения, приводит к размыву поверхности верхнего откоса плотины. При этом фильтрационный поток сдвигает с места только мелкие частицы грунта, в то время как крупные остаются на месте.

Таким образом, резкое снижение уровня воды приводит к неустановившимся фильтрационным потокам, увеличению крутизны откоса, обрушению верхней части откоса (гребня), уползанию откоса. В результате многократного повторения процесса спуска и подъема уровня воды верховой откос приобретает так называемую динамически устойчивую (более пологую) форму.

Здесь плотина не рассматривалась как деформируемое твердое тело. Тем не менее, приведенные рассуждения подтверждают полученные на основе теории упругости выводы относительно изменения наклона напорной поверхности в результате резкого снижения уровня заполнения водохранилища.

Выводы На основании результатов исследований данного раздела установлено влияние неоднородности сооружения, гидростатического давления воды и увлажнения верхового откоса на напряженно-деформированное состояние грунтового сооружения из местных материалов. При этом выявлены недостатки, допущенные при проектировании Резаксайской грунтовой плотины, выражающиеся в неудачном выборе наклона ядра, что, как показали исследования, может вызвать возникновение оползней и разрушение [8] пригребневой зоны за счет значительных по величине касательных напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liang J., Ba Z., Liu Z. Surface motion of an earth dam on layered half-space for incident plane SH waves // The 14 World Conference on Earthquake Engineering Ictjber 12-17. 2008. Beijing. China. pp.1556–1568.
2. Glagovsky V.B., Kourneva E.V. Numerical modeling of concrete face rockfill dam at seismic impact // The 14 World Conference on Earthquake Engineering Ictjber 12-17. 2008. Beijing. China. pp.556–568.
3. Салямова К.Д., Руми Д.Ф. Трансформация напряженно-деформированного состояния сооружения при неравномерном увлажнении грунта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №5. С. 94-99
4. Салямова К.Д., Руми Д.Ф. Динамика грунтовых плотин: монография. LAMBERT. Academic publication GmbH.&CO.KG, Germany, 2015. 150p.
5. ШНК 2.06.11-04.Строительство в сейсмических районах. Гидротехнические сооружения // Госархитекстрой Республики Узбекистан. Ташкент, 2004. 56с.
6. СНиП Плотины из грунтовых материалов. (СНиП 2.06.05-84) Госстрой СССР. М. 1991. 4с.
7. Гольдин А.Д., Рассказов Л.И. Проектирование грунтовых плотин. М.: Изд. АСВ. 2001.

375с.

8. Ахмедов М.А., Салямова К.Д. Анализ и повреждения гидротехнических сооружений. Ташкент: Изд. Фан ва таракият. 2016. 156с.

9. Справочник проектировщика. Под ред

А.А.Уманского. М.: Стройиздат. 1980. 974с.

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

Salyamova K.D., Rumi D.F.**THE EFFECT OF DESIGN FEATURES AND HUMIDITY PROPERTIES OF SOIL ON THE STRESS-STRAIN STATE OF EARTH DAMS BUILT FROM LOCAL MATERIALS**

The statement of the problem of determining stress-strain state of retaining hydro-technical structure under basic loads - gravity, hydrostatic pressure, soil moisture content – is given in the paper. The problem is solved in a plane elastic formulation using finite element method. The results of solving the problems are displacements, stresses and strains in earth structure. As an example, the earth dam of Rezaksay water reservoir in Uzbekistan is considered. A number of conclusions related to structure's constructions are drawn, as well as the influence of physical and mechanical properties of the soil (local rock mass) on stress-strain state is revealed.

Key words: earth dams, gravity, finite element method, stress, strain, displacement, moisture content.

Салямова Клара Джаббаровна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, институт сейсмостойкости сооружений АН РУз.

Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз

Адрес: Узбекистан, Ташкент 100125 ул. Дурмон йули 31

E-mail:klara_51@mail.ru

Руми Динара Фуадовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, институт сейсмостойкости сооружений АН РУз.

Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз

Адрес: Узбекистан, Ташкент 100125 ул. Дурмон йули 31