

Б.М. Усаченко, А.Н. Шашенко, А.С. Ковров

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ ДНЕПРОДЗЕРЖИНСКОЙ ГЭС

B.M. Usachenko, A.N. Shashenko, A.S. Kovrov

ON THE STABILITY OF THE SLOPE OF THE RIGHT-BANK DAM OF DNEPRODZERZHINSK HYDROELECTRIC POWER STATION

Выполнено моделирование геомеханических процессов, имеющих место в грунтовой толще низового откоса правобережной плотины Днепродзержинской ГЭС в программе конечно-элементного анализа *Phase2* с использованием критерия прочности Мора-Кулона. Выполнена оценка гидрологических показателей грунтового массива плотины с учетом естественных и техногенных факторов. Определены причины, обуславливающие образование воронкообразных провалов на поверхности деформированного откоса.

Ключевые слова: *устойчивость откосов, метод конечных элементов, коэффициент снижения прочности, критерий прочности Мора-Кулона*

Актуальность работы. При решении разнообразных задач гидрогеологии и инженерной геологии все чаще приходится сталкиваться с необходимостью изучения массивов горных пород и содержащихся в них подземных вод в неразрывной связи. Это касается и оценки физико-механических свойств горных пород, и изучения геодинамических процессов, и исследований движения подземных вод, и постановки многих прикладных задач.

Устойчивость техногенных откосов обусловлена геометрическими параметрами, прочностью вмещающих пород, трещиноватостью и слоистостью массива, положением плоскостей трещин, режимом грунтовых вод и другими факторами [1].

Подземные воды – одна из основных причин возникновения оползневых и других видов деформаций откосов. Их влияние сводится к изменению механических свойств пород, изменению напряженного состояния пород вблизи откоса и, наконец, развитию процессов механического выноса и сноса (так называемые фильтрационные деформации) [2].

Поэтому оценка устойчивости откосов и плотин гидротехнических сооружений с использованием современных методов численного моделирования является важной инженерной задачей.

Постановка задачи. Влияние подземных и поверхностных вод на прочность водонасыщенных глинистых пород гидротехнических сооружений проявляется в основном в процессе их набухания. В глинах, обладающих сцеплением упрочнения, эти процессы развиваются лишь тогда, когда сила набухания превышает прочность жестких структурных связей, обусловленных цементирующими соединениями.

Для мягких связных пород характерны пластические деформации, относительно низкая прочность и высокая сжимаемость, низкая проницаемость и большая влагоемкость. Все эти свойства объясняются прежде всего присутствием в значительных объемах глинистых минералов, представленных частицами размером менее 0,001–0,002 мм. Огромная удельная по-

верхность таких мелкодисперсных систем приводит к развитию внутренних сил взаимодействия между частицами совершенно особого – водноколлоидного типа.

При этом, *наиболее интенсивно процесс набухания протекает вдоль трещин и особенно плоскостей напластования*: интенсивное набухание нередко происходит лишь на контактах глинистого пласта с водоносными породами и быстро затухает с удалением от этих контактов. Одна из причин указанного явления заключается в том, что во многих случаях (особенно в плотных глинах, обладающих сцеплением упрочнения) контактная зона глинистого пласта нарушена многочисленными микротрещинами, вдоль которых идет поступление воды в породу. Кроме того, осмотический градиент является максимальным именно на контактах глинистых и водоносных пород. Ввиду набухания контактная зона глинистого пласта часто оказывается в пластичном состоянии, что является одной из причин возникновения „контактных оползней“.

Глинистые породы, по составу отвечающие супесям и легким суглинкам, подвергаются интенсивному набуханию лишь вблизи самой поверхности фильтрующих откосов вследствие малых величин максимального напряжения набухания. Процесс набухания таких пород на поверхности откосов обычно завершается полной потерей ими связности и превращением в текучее состояние, что приводит к оплыванию набухших пород слоями в 15–20 см даже при пологих углах откосов (18–20°).

Ввиду того, что набухание связано с фильтрацией воды через глинистые породы, скорость его зависит от фильтрационных свойств пород: наиболее быстро оно протекает в песчаных и пылеватых глинах, наиболее медленно – в жирных глинах. Скорость набухания будет возрастать при увеличении градиентов фильтрации воды через толщу набухающих пород. Поэтому, в частности, набухание идет весьма интенсивно при стекании воды по поверхности откоса глинистых пород, если до этого вся вода в них находилась в капиллярно-натяженном состоянии. Под влия-

нием поверхностных вод капиллярные силы исчезают и начинается фильтрация этих вод в глины под большим градиентом. По мере движения жидкости влажность глин повышается, градиент падает и, в конце концов, фильтрация почти полностью затухает.

Набухание глинистых пород усиливается при приближении касательных напряжений к предельным величинам. Увеличение объема пород в области максимальных деформаций сдвига усиливает процесс всасывания воды и набухания пород.

В глинистых породах, залегающих выше уровня подземных вод, дополнительное увлажнение почти всегда приводит к ухудшению прочностных свойств вследствие увеличения толщины гидратных оболочек, набухания и растворения цементирующих соединений. Наблюдения показывают, что увлажнение пород в зоне аэрации и обусловленные им изменения количества связанной воды оказывают весьма ощутимое влияние на сопротивление сдвигу при влажности, меньшей максимальной молекулярной влагоемкости; при дальнейшем увеличении влажности значительные изменения прочности отмечаются лишь по достижении водонасыщенного состояния – при возможности набухания.

В глинистых породах, обладающих сцеплением упрочнения, природные воды могут вызывать растворение или выщелачивание цементирующих соединений. Наиболее характерны такие процессы для загипсованных, карбонатизированных и засоленных пород (лёссовидные суглинки, мергельные глины и т.п.), приуроченных к зоне аэрации, когда они испытывают дополнительное увлажнение (например, техническими водами). Так как при строительстве инженерных сооружений скорости фильтрации подземных вод нередко резко возрастают и, кроме того, в ряде случаев воды заметно опресняются за счет подпитки из поверхностных водоемов, то растворение и выщелачивание цементирующих соединений возможно в породах, обладающих сцеплением упрочнения, и при их залегании ниже уровня грунтовых вод – эти обстоятельства особенно важно учитывать при проектировании и оценке устойчивости плотин.

В данной работе объектом исследования является устойчивость правобережной плотины Днепродзержинской ГЭС.

За полувековую эксплуатацию плотины произошло существенное ухудшение параметров дренажной системы, вызванное в основном ее заилием. В конце прошлого века были отмечены выходы воды на уровне бермы, что вызвало необходимость реконструкции в 2001 г. существующей дренажной системы, а в 2005 г. – строительство дополнительного закрытого трубчатого дренажа на участке выполаживания низового откоса.

Удовлетворительное состояние плотины в целом не означает отсутствия проблем, возникающих в процессе ее эксплуатации. Одной из них является последовательное образование за период с мая 2009 г. по сентябрь 2010 г. трех провальных воронок на низовом откосе в створе ПК 14+50 м.

Поэтому, целью настоящей работы является определение причин, обусловивших появление на поверхности откоса в створе ПК 14+50 м провальных воронок, а также оценка устойчивости гидротехнического сооружения при заданных геометрических параметрах и физико-механических характеристиках слагающих грунтов методом конечных элементов. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить моделирование геомеханических процессов, имеющих место в грунтовой толще низового откоса плотины в пределах от ПК 14 до ПК 16 методом конечных элементов с использованием критерия Мора-Кулона в программе *Phase2*.

2. Выполнить моделирование гидрологических процессов.

Моделирование геомеханических и гидрологических процессов. Для оценки устойчивости массива горных пород насыпных массивов и описания их поведения при статических и динамических внешних нагрузках используют различные критерии прочности.

При аналитических исследованиях параметров упругопластического состояния чаще всего используется критерий прочности Мора с прямолинейной огибающей предельных кругов главных напряжений.

Прочностными характеристиками, входящими в условие прочности, основанное на прямолинейной огибающей предельных кругов главных напряжений, являются угол внутреннего трения ρ и сцепление C , либо пределы прочности на одноосное сжатие R_c и растяжение R_p . В механику горных пород, объектом исследований которой являются, как правило, породы скального типа, угол внутреннего трения и величина сцепления как прочностные характеристики были перенесены из механики грунтов, науки более старой, чем геомеханика. Так, при оценке предельного состояния широко используется линейное соотношение Мора-Кулона, имеющее вид

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \rho.$$

Здесь τ – напряжение сдвига, σ_n – нормальное напряжение. С известным допущением условие прочности Кулона может применяться, когда речь идет о грунтах или сыпучих породах, хотя, как показал М.М. Протодьяконов, огибающая предельных кругов Мора даже при испытаниях песка имеет все же криволинейную форму (рис. 1). Для связанных пород в области сжатия отличие реальной криволинейной огибающей от прямолинейной весьма существенно.

Критерий Мора-Кулона применяется в геомеханике для оценки разрушения горных пород и грунтов. Критерий предполагает, что обрушение происходит вдоль плоскости без увеличения объема пород.

Критерий Мора-Кулона также может быть выражен в основных напряжениях следующим образом

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2C \cos \varphi}{\sigma_3 (1 - \sin \varphi)} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Одна из причин, по которой критерий Мора-Кулона часто используется в геомеханике – то, что он может быть описан простым математическим выражением, легок для понимания и прост в использовании.

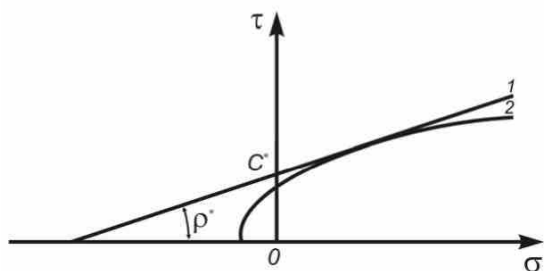


Рис. 1. Переход от криволинейной огибающей предельных кругов Мора к прямолинейной: 1 – прямолинейная; 2 – криволинейная

В настоящее время для моделирования устойчивости естественных и техногенных откосов широко используются разнообразные программные продукты с интегрированными модулями, позволяющими выполнять расчеты методами конечных элементов, граничных элементов, дискретных элементов, конечных разностей и др.

В качестве инструмента моделирования устойчивости откосов и бортов карьеров использована спе-

циализированная программа конечно-элементного анализа *Phase2* версии 7.0. Программа позволяет выполнять анализ устойчивости откосов методом конечных элементов, анализируя процесс снижения предела прочности на сдвиг (*Shear Strength Reduction Method*) в породном массиве [3].

Функция снижения прочности на сдвиг (*Shear Strength Reduction*) в *Phase2* позволяет автоматически выполнять конечно-элементный анализ и вычислять критический коэффициент снижения прочности *КСП* (*SRF, Strength Reduction Factor*) для выбранной модели, который по своему смыслу является эквивалентным коэффициенту запаса устойчивости откоса.

Алгоритм расчета коэффициента устойчивости массива включает итерационное вычисление прочностных характеристик во всех элементах массива посредством поэтапного нагружения модели, в результате чего напряжения в откосе достигают предела прочности на сдвиг и возникает сдвигение пород (оползень). Процесс вычислений *КСП* повторяется до момента потери откосом устойчивого состояния и графически выражается в виде наиболее вероятной линии скольжения, по которой происходит сдвигение массива. Если *КСП* > 1, то откос находится в устойчивом состоянии, а при *КСП* < 1 возникают оползневые процессы.

В программе конечно-элементного анализа создаются геометрические параметры профиля плотины (рис. 2).

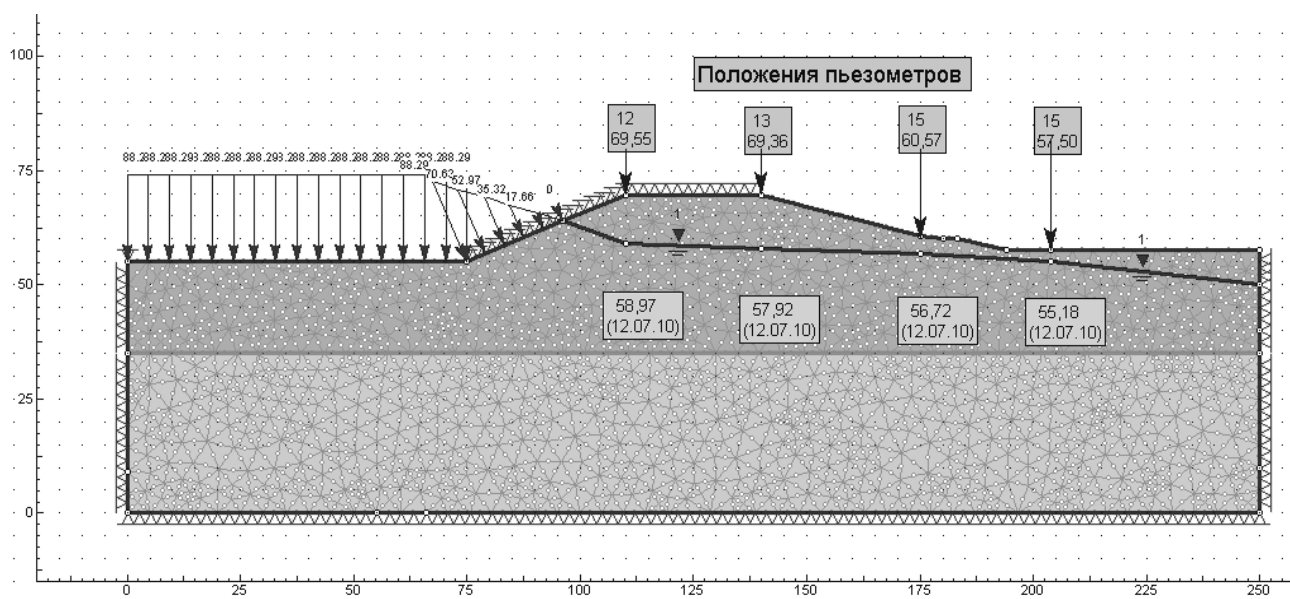


Рис. 2. Геометрические параметры откоса (м)

Область геометрической модели откоса разбивается на конечные элементы и задаются физико-механические характеристики породного массива (таблица).

Физико-механические характеристики грунтов, слагающих тело плотины, задавались по данным ОАО „Укргідропроект“.

Согласно исходным данным и с учетом критерия прочности Кулона-Мора наиболее значимыми факторами, определяющими устойчивость правобереж-

ной части Днепродзержинской плотины, являются плотность грунтов тела плотины, сцепление и угол внутреннего трения.

Плотность грунтов принимается $1,6 \text{ т/м}^3$ по проектным данным. При этом, плотность частиц песка, являющегося механическим скелетом, равна $2,65 \text{ т/м}^3$, а плотность частиц грунта колеблется в диапазоне $1,55\text{--}2,12 \text{ т/м}^3$ в зависимости от гранулометрического состава фракций песка и содержания в грунте глинистых частиц.

Таблиця

Физико-механические характеристики грунтов

Наименование	Единица измерения	Значение
Модуль Юнга	кПа	20000
Коэффициент Пуассона	безразм.	0,35
Плотность	кН/м ³	16,0
Предел прочности на растяжение	кПа	40
Сцепление	кПа	15
Угол внутреннего трения	град.	31

Сцепление является важным прочностным показателем сопротивления грунтов сдвигу, по исходным данным равен 0 как для песков. Однако, по мнению авторов, величина эта не может быть равной 0, так как уже в процессе намыва плотины грунт представляет собой сложную песчано-глинистую смесь. Более того, в процессе эксплуатации гидротехнического сооружения происходит заиливание прибортовой и донной части. Поэтому, по физико-механическим характеристикам грунты, слагающие тело плотины, можно отнести к заиленным суглинкам или к заиленным аллювиальным пескам, для которых показатель сцепления по данным [2, 4] варьирует в диапазоне

14–20кПа, а угол внутреннего трения составляет 15–32° или, в среднем, 23°.

Результаты исследований. Результаты численного моделирования геомеханических процессов в теле плотины показали, что при выбранных геометрических параметрах и физических характеристиках откос в целом является устойчивым (КСП=3,6).

На рис. 3 видно, что на рассматриваемом участке плотины П14+50 по состоянию на 12.07.10г. наблюдаются процессы нарушения устойчивости с возникновением очагов избыточных растягивающих напряжений. Так, максимальные горизонтальные смещения в исследуемом створе наблюдаются на участке протяженностью до 15,3 м на расстоянии 6 м выше от горизонтальной бермы, что соответствует реальным просадкам на поверхности откоса, которые были выявлены и обследованы сотрудниками Института геотехнической механики НАН Украины. Выявленные деформации поверхности обусловлены поднятием уровня депрессионной кривой, что вызывает разрушение подстилающих грунтов и ослабление их прочностных характеристик.

В свою очередь, долговременное нарастание горизонтальных растягивающих напряжений вызывает вертикальные смещения в верхней части откоса, создавая тем самым угрозу зарождения оползневых процессов (рис. 4).

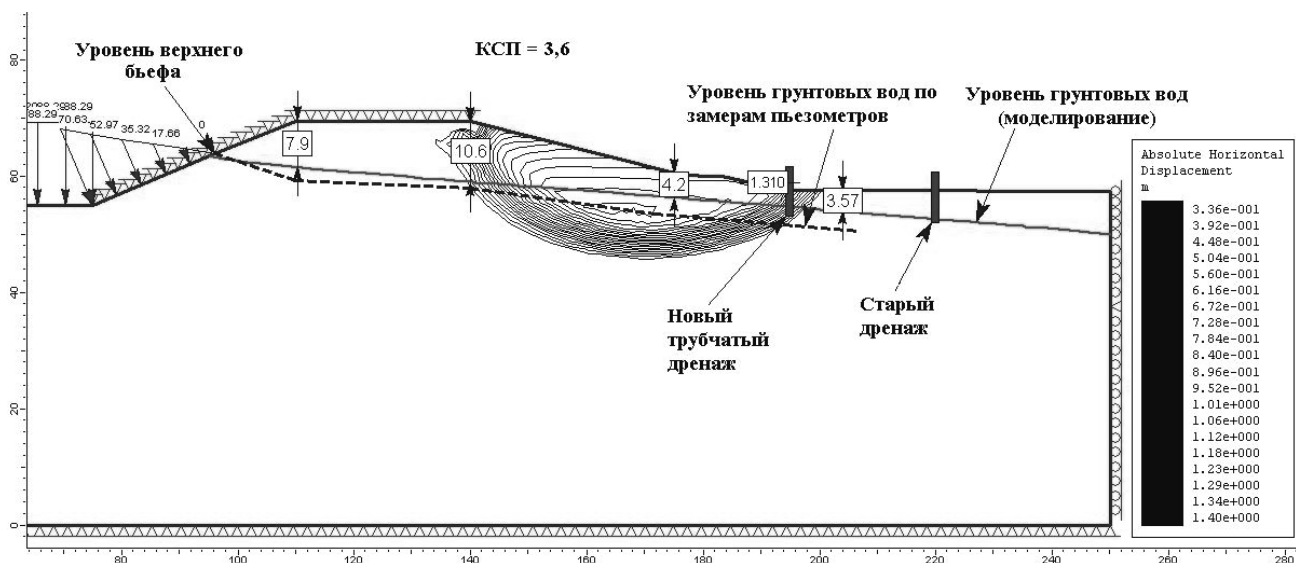


Рис. 3. Графическое изображение горизонтальных смещений в откосе

Таким образом, возможное возникновение поверхности скольжения в прибортовом массиве обусловлено возникновением областей нарастающих горизонтальных смещений грунта в центральной части откоса вследствие снижения прочности подстилающих грунтов, а также на верхнем гипсометрическом уровне +69,55м вследствие нарастания избыточных растягивающих напряжений, направленных от нижней части откоса вверх (рис.5).

Области с наиболее интенсивными напряжениями идентифицируют как область вероятной линии сдвиге-

ния в откосе, по которой при заданных условиях возникнет сдвигение массива грунтов. Линия сдвига берет начало на некотором расстоянии от верхней бровки откоса и выходит на расстоянии 4,0±0,5 м от нижней бровки.

Моделирование гидрологических параметров позволило определить коэффициент фильтрации, направление векторов фильтрации и местоположение депрессионной кривой. Как видно из рис. 6, скорость инфильтрации воды составляет 4,4756e⁻⁷ м/с. Также показаны расстояния от поверхности до уровня грунтовых вод в отдельно выбранных точках откоса.

Полученные результаты гидрологического моделирования позволяют также оценить общий гидравлический градиент (рис. 7).

Более детальное изучение гидравлического градиента в теле плотины позволяет идентифицировать характерные области избыточного гидравлического напора, которые расположены между депрессионной кривой и поверхностью откоса и имеют форму полусфер. Сред-

ние размеры их варьируют в диапазоне 3–4 м, а значения гидравлического градиента в этих точках сопоставимы с аналогичными в области верхнего бьефа.

Примечательно, что расположение трех областей повышенного гидравлического градиента выше отметки нового трубчатого дренажа практически совпадает с положением трех провальных участков в рассматриваемом створе.



Рис. 4. Графическое изображение вертикальных смещений в откосе

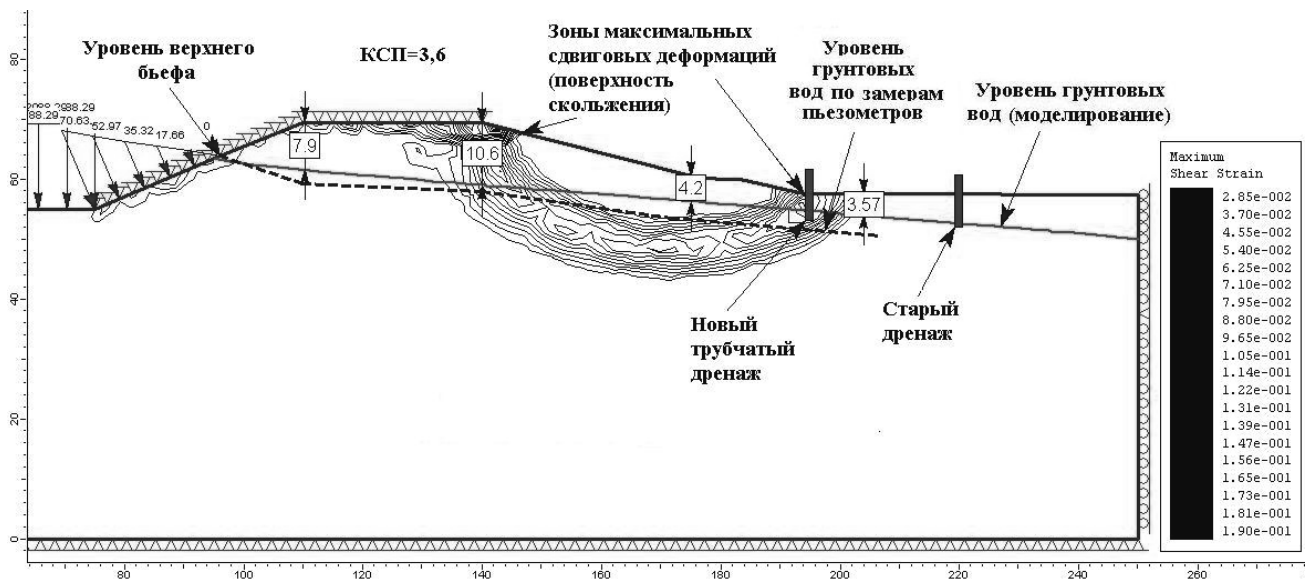


Рис. 5. Графическое изображение области избыточных напряжений и зарождающихся вертикальных смещений в откосе

Как видно из рис. 7, области повышенного градиента чередуются с областями пониженного градиента, что объясняет возникновение отдельных небольших провалов, а не сплошной мульды сдвига. По одной из версий авторов, причиной возникновения этих участков является инфильтрация атмосферных осадков и поверхностный сток.

Интерпретация результатов. Воздействие подземных вод как силового фактора на горные породы может сводиться не только к изменениям напряженного состояния массива, но и к сопутствующему этим изменениям нарушению структуры (или разрушению) грунта под влиянием процессов механического выноса и сноса, обусловленных гидродинамическими силами или фильтрационными деформациями.

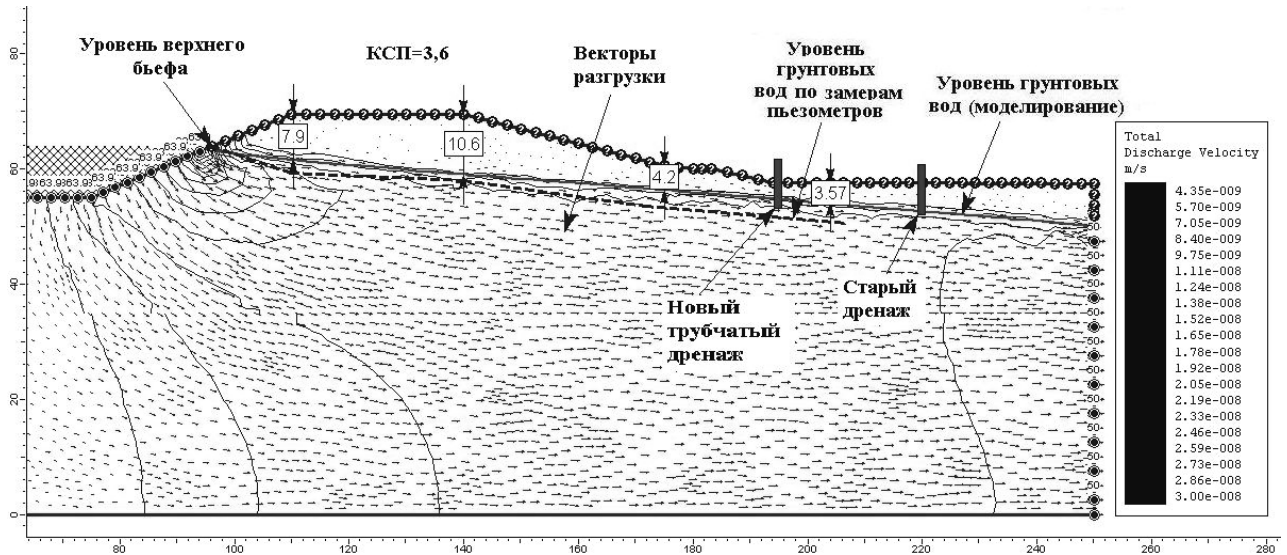


Рис. 6. Скорость общей разгрузки ($4,4756 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$)

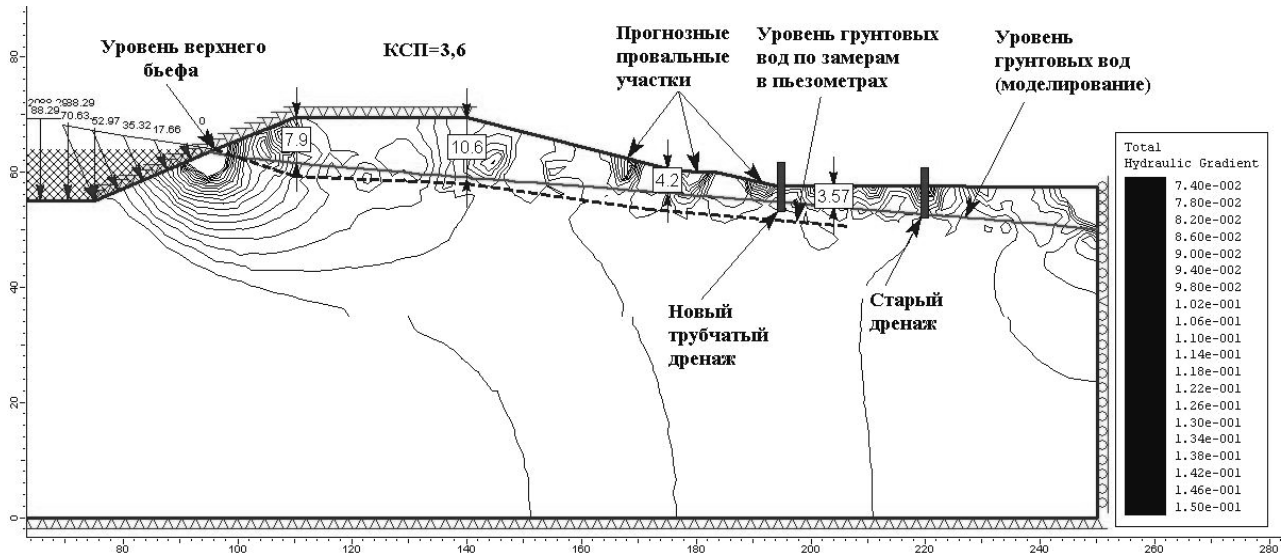


Рис. 7. Графическое изображение общего гидравлического градиента

Анализируя результаты моделирования и сопоставляя их с полевыми исследованиями, очевидно, что имеет место механическая суффозия, т.е. вынос мелких частичек грунта через поры более крупнозернистого скелета. При этом вынос может либо носить ограниченный характер, либо приводить к разрушению грунта. Степень развития суффозии для данного грунта определяется в первую очередь его коэффициентом неоднородности и градиентом фильтрации. Так высокие градиенты фильтрации, вызывающие прогрессирующую суффозию, могут отмечаться вблизи низовых откосов земляных плотин или на участках основания плотин в нижнем бьефе. В последнем случае опасность для устойчивости плотины может представлять даже ограниченный суффозионный вынос, приводящий к снижению сопротивления сдвигу пород низового откоса или к увеличению сжимаемости пород основания с последующей неравномерной осадкой плотины.

Также существует предположение, что в слабоцементированных породах откоса плотины развивается трещиноватость, в результате чего происходит фильтрационный размыв и вынос частиц вдоль трещин. Этот процесс носит эрозионный характер, напоминая до некоторой степени размыв русла открытым потоком, при определенных условиях он может привести к образованию подземных пустот и провальных воронок (так называемый песчаный карст), что и имеет место в действительности.

Так, например, наблюдения на Лебединском карьере КМА [2] показали, что на тех участках борта, где угол наклона не превышал 20–25°, вынос частиц вдоль трещин в цементированных (железистым цементом) разностях песков быстро прекращался, так что нарушений на этих участках не отмечалось. Наоборот, при крутых углах вынос быстро прогрессировал, в процесс вовлекались все новые массы песка и в конечном счете образовались подземные пустоты,

сопровождавшиися провальними воронками на поверхності. В целом этот вид деформаций встречается редко и может получить заметное развитие лишь в слабосцементированных (сцепление меньше $0,2-0,3 \text{ кгс/см}^2$) песчаниках на неглинистом цементе.

Выводы. Применение метода конечных элементов с использованием программного пакета *Phase2* позволяет достаточно точно анализировать геомеханические и гидрологические процессы, происходящие в насыпных и намывных массивах, и устанавливать закономерности нарушения их устойчивости. Однако точность результатов сильно зависит от исходных данных для анализа, которыми в данной работе являются физико-механические факторы грунтов, обуславливающие прочностные свойства намывного массива. По мнению авторов, при расчетах следует учитывать значение сцепления для заиленных грунтов ($14-20 \text{ кПа}$), так как нулевое значение принимается только для чистых песков, без примесей глинистых частиц. Угол внутреннего трения по результатам многочисленного моделирования устойчивости для мягких горных пород и грунтов существенного влияния на устойчивость массива не оказывает.

Возникновение просадок на откосе правобережной части плотины Днепродзержинской ГЭС обусловлено рядом взаимосвязанных процессов. Поднятие уровня депрессионной кривой обусловлено инфильтрационными процессами в теле плотины, что способствует разупрочнению грунтов и нарастанию горизонтальных смещений в центральной части откоса. В результате растягивающие напряжения передаются в верхнюю часть откоса, обуславливая вертикальные смещения на верхнем гипсометрическом уровне МП 69,36м. При условии снижения прочности массива и нарастании тангенциальных (сдвигающих) сил образуются очаговые области избыточных напряжений, в которых инициируются сдвиговые процессы, приводящие к возникновению поверхности скольжения.

Список литературы

1. Шашенко О.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід / Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапєєв С.М.; Монографія. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2008. – 224 с. – Рос. мовою.
2. Мироненко В.А. Основы гидрогеомеханики / В.А. Мироненко, В.М. Шестаков. – М.: „Недра“, 1974. – 296 с.
3. Tutorials for Phase 2D elasto-plastic finite element program for slope and excavation stability analyses.
4. Проектирование и устройство фундаментов на намывных песчаных грунтах / [Слюсаренко С.А., Степаненко Г.П., Глотова М.А., Новиков М.Ф. и др.]. – К.: Будівельник, 1990. – 128 с.

Виконано моделювання геомеханічних процесів, які мають місце в ґрунтовому шарі низового укосу правобережної греблі Дніпродзержинської ГЕС у програмі кінцево-елементного аналізу *Phase2* з використанням критерію міцності Мора-Кулона. Виконано оцінку гідрологічних показників ґрунтового масиву греблі з урахуванням природних та техногенних факторів. Визначено причини, що обумовлюють утворення воронкоподібних провалів на поверхні деформованого укосу.

Ключові слова: *стійкість укосів, метод кінцевих елементів, коефіцієнт зниження міцності, критерій міцності Мора-Кулона*

Modelling of the slope stability for the right-bank dam of Dneprodzerzhinsk hydroelectric power station in the finite-element method software *Phase2* by Mohr-Coulomb failure criterion has been carried out. Hydrogeological parameters for the dam soil using natural and technogenic factors have been evaluated. The causes of generation of funnel-shaped gaps on the surface of deformed slope have been defined.

Keywords: *slope stability, finite-element method, Strength Reduction Factor, Mohr-Coulomb failure criterion*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. О.О. Сдвижковою.
Дата надходження рукопису 02.12.10*