

consequences. This article provides guidelines for progressive collapse and discusses design models of already constructed buildings taking into account collapse of bearing elements.

Key words: construction, progressive failure, РС «Мономах-САПР», РС «ЛИРА-САПР»

Анотація. Актуальним завданням для проектування будівель і споруд є розрахунок на прогресуюче обвалення. Розрахувати об'єкт який будується на навантаження, які будуть діяти на нього протягом строку його експлуатації не достатньо; потрібно робити ряд розрахунків пов'язаних з форс-мажорними ситуаціями, які можуть призвести до незворотних наслідків. У даній статті наведені рекомендації для прогресуючого обвалення і розглядаються розрахункові схеми вже зведених будівель з урахуванням обвалення несучих конструктивних елементів.

Стаття надійшла до редакції у грудні 2013р.

УДК 624.137:539.3

Кириак К.К., к.т.н.²⁹
ЦНТУ «Инжзащита»,
г. Ялта, Украина,

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. В статье рассматривается механизм деформирования оползневой системы, характерные особенности ее оползания. Определение коэффициента устойчивости, исходя из структурных особенностей массива. Вероятность потери устойчивости.

Ключевые слова: оползень, оползневая система, устойчивость склона, метод РЕМ/FEM, вероятность потери устойчивости.

²⁹ © Кириак К.К.

Состояние проблемы. Значительные темпы развития рекреационного и курортного строительства, неконтролируемое использование природных ресурсов, вследствие значительной активизации туризма, обусловило техногенную дестабилизацию геологической среды и активацию опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) в регионах Украины особенно в Крыму. Сегодня на территории АР Крым ведется интенсивное освоение сложных в геологическом отношении территорий, в результате чего происходит нарушение гидрогеологического режима, изменение баланса сил на оползневых склонах ухудшение существующих и образование новых нестабильных территорий. Развитие прикладных программ численного моделирования для решения геотехнических задач позволяет максимально точно определить влияние геомеханических и геодинамических параметров на устойчивость оползневых грунтовых массивов. *Целью* данной работы является оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) оползневого склона в п. Ореанда и определение вероятности потери его устойчивости на основе метода конечных элементов.

Методика. В основу статьи положено комплексное исследование оползневого склона: инженерно-геологические изыскания геоморфологических и гидрогеологических параметров с учетом сложной геодинамической обстановки; численное моделирование и определение устойчивости оползневой системы в инженерной программе конечно-элементного анализа Phase².

Результаты. Выполнено моделирование устойчивости оползнеопасного склона в программе конечно-элементного анализа Phase². Проанализирована геомеханическая

устойчивость и определен коэффициент устойчивости оползневого склона с учетом геоморфологических параметров и физико-механических характеристик массива пород по критерию прочности Кулона-Мора и Друкера-Прагера. Установлена вероятность потери устойчивости оползневой системы с учетом ее структурных особенностей.

Научная новизна. В результате численного моделирования геомеханических процессов в оползневом теле, впервые установлен процент снижения устойчивости оползневой системы с учетом геоструктурных особенностей грунтового массива. Аналитически определена вероятность разрушения оползневой системы и закономерность деформирования, что позволяет прогнозировать развитие экзогенных геологических процессов.

Практическая значимость. Выполненный анализ геомеханической устойчивости оползневого склона, позволил определить характер развития оползневого процесса и вероятность потери устойчивости оползневой системы.

Актуальность. Распространение оползней на южном берегу Крыма (ЮБК) связано с совокупностью естественно исторических факторов и в последнее время преимущественно с деятельностью человека, в частности с нерациональной застройкой, частичной или полной перепланировкой склонов и строительством на них различных объектов хозяйствования.

В настоящее время в Крыму наступил пик региональной активизации оползневых процессов, который прогнозировался на 2012-2014 годы [1].

Сложность оползней ЮБК заключается во множестве факторов влияющих на их общую и локальную устойчивость.

Механизм оползневой процесса определяется структурно-тектоническими условиями и литолого-петрографическими характеристиками деформируемых геологических тел [2].

Большое влияние на характер оползания оказывает изменение свойств пород в зоне смещения под влиянием их увлажнения. Это нередко приводит к тому, что оползневые деформации достигают критических значений [1,2].

Учет совокупности множества факторов влияющих на устойчивость склонов ЮБК при оценке НДС и характера оползания, прогнозирование вероятности развития оползневых процессов является актуальным научно-техническим заданием.

Анализ последних исследований и публикаций. Оползни ЮБК в различное время были изучены и систематизированы многими учеными. В работе И.Ф. Ерыша представлены комплексные исследования по систематизации и микрорайонированию оползневой обстановки с учетом гидрологических и геоморфологических факторов [1]. Конечно-элементный анализ, оползневых откосов и противооползневых сооружений с учетом сейсмических воздействий прямым динамическим методом рассмотрен в работе [3]. Значительный интерес представляет работа по определению параметров для численного моделирования поведения грунтов Л.А. Строковой из технического университета г. Мюнхен [4].

Для более глубокого изучения геомеханических процессов, имеющих место в грунтовой массе, практический интерес представляет численное моделирование оползневой склона с учетом геоморфологических и гидрологических особенностей в естественном состоянии.

Формулирование целей и постановка задач. *Целью* данной работы является оценка напряженно-деформированного состояния оползневого склона в п. Ореанда и определение вероятности потери его устойчивости на основе метода конечных элементов. Для достижения цели поставлены следующие *задачи*:

1. Проанализировать геомеханическую устойчивость оползневого склона при помощи конечно-элементного анализа в инженерной программе Phase², с учетом геоморфологических особенностей массива пород по критериям прочности Кулона-Мора и Друкера-Прагера.

2. Определить возможность потери устойчивости оползневого склона при помощи вероятностного анализа методом РЕМ/FЕМ с использованием алгоритма SSR.

Изложение основного материала. Рассматриваемый участок находится на территории п. Ореанда между сан. «Глициния» и сан. «Ливадия», на котором находится современный оползень №54 [5] (рис. 1).

В геоморфологическом отношении исследуемая территория расположена в прибрежной части среднекрутого и крутого древнеоползневого склона восточной и юго-восточной экспозиции в пределах древнеоползневой ступени с абсолютными отметками 70-115 м.

В геоструктурном отношении район исследований расположен в северо-восточной части Лимено-Ялтинской антиклинали, входящей в состав Южнобережного поднятия.

В геологическом строении участка и склона принимают участие два комплекса горных пород. Нижний, являющийся региональным водопором и фундаментом для верхнего, сложен коренными породами Таврической серии,

представленними бескарбонатним флишем из переслаивающихся аргиллитов, алевролитов и песчаников.

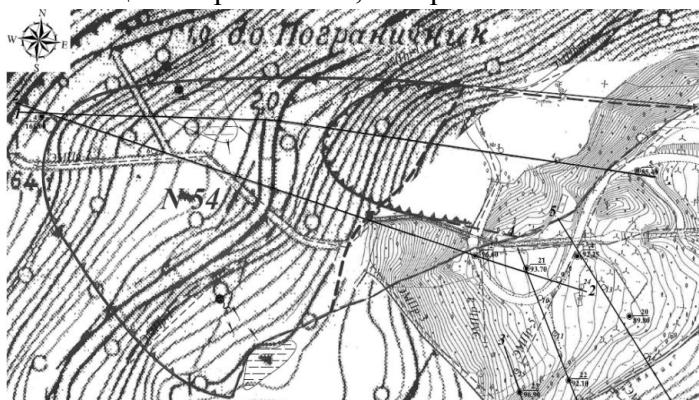


Рис. 1. Геодинамическая обстановка на участке

По результатам выполненных инженерно-геологических исследований, с учетом результатов инженерно-геологических изысканий, выполненных ранее на данной и прилегающей территории, в пределах исследуемого участка с учетом стратиграфо-генетических комплексов (СГК), распространены инженерно-геологические элементы (ИГЭ), представленные в табл. 1.

Таблица 1

Инженерно-геологические элементы оползневого склона

№	№ СГК	Наименование грунта по ГОСТ 25100-95	Геологически й индекс	№ ИГЭ	Описание
1	СГК-1	Техногенные образования	tQ_4	ИГЭ-1	Насыпной грунт: щебень, суглинок дресвяно- щебенистый неоднородный, неслежавшийся, с примесью строительного мусора.

2	СГК-2	Нерасчлененные верхнечетвертично- современные и современные отложения	dpQ_{3-4}	ИГЭ-2	Суглинок серовато-коричневый, коричнево-серый и серый, с дресвой и щебнем аргиллита, песчаника и известняка, тугопластичный и полутвердый.
			dpQ_4	ИГЭ-3	Смешанные пачки аргиллитов, участками деградированные до состояния дресвы и щебня, аргиллиты выветрелые, трещиноватые.
3	СГК-2		dpQ_4	ИГЭ-4	Дресва и щебень известняка с суглинистым заполнителем
4	СГК-3	Коренные грунты Таврической серии	T_3-J_1	ИГЭ-5	Аргиллиты плитчатые, тонкоплитчатые и чешуйчатые, темно-серые, маловлажные, с прослоями алевролитов и песчаников, маловлажные.

Физико-механические характеристики верхних инженерно-геологических слоев приведены в табл. 2. Условия залегания ИГЭ приведены на рис. 2.

Подземные воды в пределах площадки проектируемого строительства и прилегающей территории залегают на разной глубине относительно дневной поверхности и приурочены к верхней трещиноватой зоне Таврических пород и оползневым отложениям.

Фльтрационные потоки подземных вод характеризуются поточно-струйчатый характером движения и распространены, в основном, в дресвяно-щебенистых четвертичных отложениях и трещиноватых грунтах Таврического флиша.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунтового массива

Наименование инженерно-геологических элементов	Плотность γ , кН/м ³	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения ϕ , град	Модуль Деформации, МПа
ИГЭ-1 – насыпной грунт: щебень, суглинок дресвяно-щебенистый неоднородный	19,6	0,007	20	20
ИГЭ-2 – суглиноксеровато-коричневый	21,3	0,060	18	36
ИГЭ-3 – смещенные пачки аргиллитов	22,4	0,065	18	38
ИГЭ-4 –дресва и щебень известняка с суглинистым заполнителем	22,5	0,020	28	48
ИГЭ -5 – аргиллиты плитчатые	24,0	0,088	19	120
ИГЭ -6 – суглинок (зона скольжения)	22,3	0,013	22	36

Оползневая территория характеризуется развитием регрессивных смещений вдоль оползневого склона с общим базисом разгрузки. Пик активности последнего наблюдался в течение предшествующего десятилетия. При этом активные оползневые формы наиболее выражены в головной части оползневого очага, где сформированы опущенные трещины растяжения, достигающие 1-1,5 м как по горизонтальной, так и по вертикальной составляющим. В районе базиса разгрузки оползневого очага сформировались валы напользания и

деформации внутреннего сжатия с раскрытием трещин и выпиранием грунта.

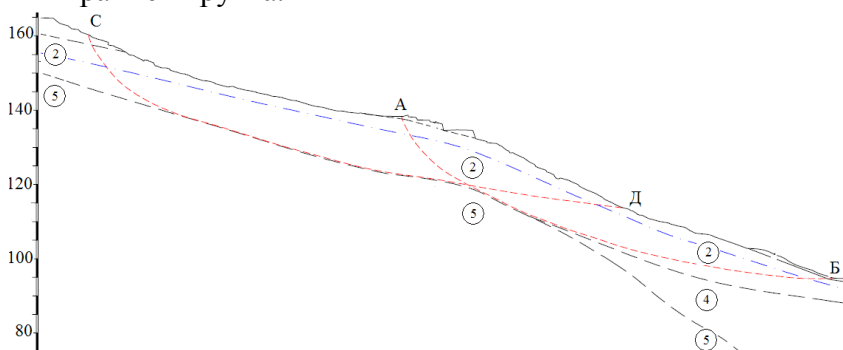


Рис. 2. Условия залегания инженерно-геологических элементов

На основании выполненных исследований установлено, что скорость оползания незначительная и характеризуется деформациями суглинистой зоны как пластичного и вязкого тела, по которой происходит сдвиг А-Б, С-Д (см. рис. 2).

Для оценки геомеханической устойчивости оползневого склона использована инженерная программа конечно-элементного анализа Phase² версии 8.0 компании Rocscience Inc. (www.rocscience.com).

По данным инженерно-геологических изысканий заданы геометрические параметры рассматриваемого грунтового массива, профиль которого изображен на рис. 3.

Область геометрической модели разбивалась на конечные элементы, а для инженерно-геологических слоев присваивались физико-механические характеристики грунтового массива согласно данным, приведенным в табл. 2.

В качестве критерия прочности при моделировании грунтового массива выбран критерий Кулона-Мора, часто

используемый для оценки прочности грунтов и мягких пород.

Так как установлено, что сдвиг происходит по кривым А-Б, С-Д, для моделирования пластического течения зоны скольжения применен критерий прочности Друкера-Прагера [6].

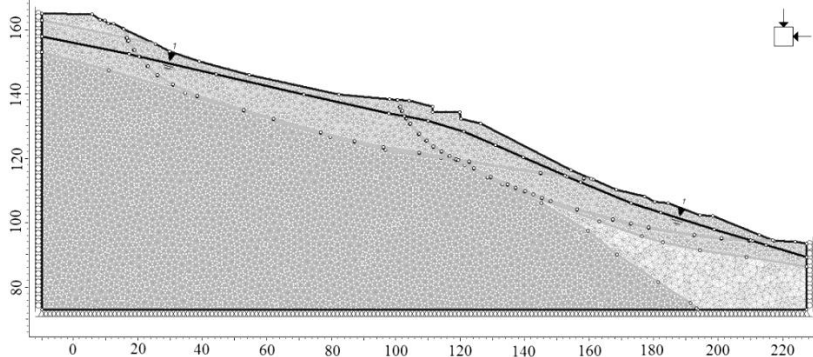


Рис. 3. Геометрические параметры склона в программе Phase2

Определение геомеханических параметров зоны скольжения основывается на сдвиговых испытаниях грунта методом «плашка по плашке» по смоченной поверхности и уточнялись обратным расчетом, исходя из предельного равновесия оползневого склона (см. табл. 2).

Для компьютерного моделирования зоны скольжения, при построении геометрической модели в инженерной программе Phase², необходимо определить мощность ее залегания. Исходя из исследований проведенных в [7], величину раскрытия зоны скольжения можно определить исходя из уравнения:

$$\delta = \frac{\tau_0}{\rho K_x},$$

где τ_0 - динамическое напряжение сдвига; $K_x = g \sin \alpha$ - удельная сдвиговая сила.

Программа конечно-элементного анализа Phase² позволяет моделировать геомеханические процессы, происходящие в грунтовом массиве. В программе используется итерационный алгоритм снижения прочностных параметров (*SSR, Shear Strength Reduction*), путем введения корректирующего (ослабляющего) коэффициента (*SRF, Strength Reduction Factor*). Целью расчетов является определение критического значения коэффициента снижения прочности (*КСП*), при котором происходит сдвиг массива.

В результате выполненного моделирования определены наиболее напряженные области с максимальными сдвиговыми деформациями и характер их пространственно-геометрического расположения (рис. 4).

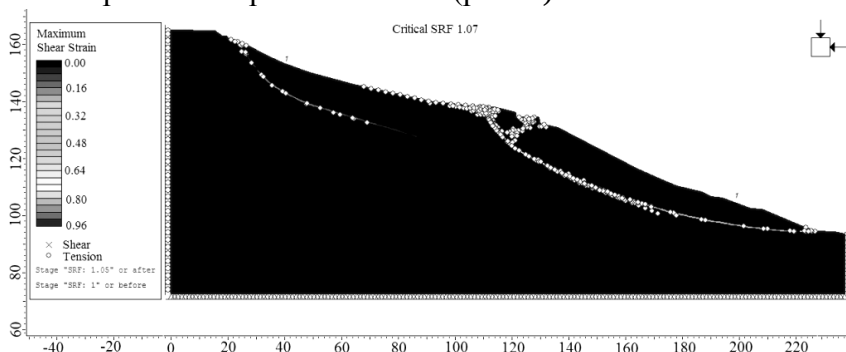


Рис. 4. Зоны максимального напряжения

Полученные на модели области напряженности и закономерности их развития в полной мере коррелируются с установленными натурными деформациями.

Экспериментально подтвержден предполагаемый характер регрессионного развития оползневого процесса, свидетельствующий о происходящих медленных деформациях с постепенным перераспределением масс по

склону и вовлечением более стабильного верхнего оползневого массива в движение (см. рис. 3).

Характерной особенностью является последовательное увеличение напряжений в головной части верхнего оползневого тела за счет перемещений нижнего макроблока на более низкий гипсометрический уровень. Общие перемещения (*total displacement*) оползневой системы представлены на рис. 5 и составляют $U_{xv} = 0,096\text{м}$.

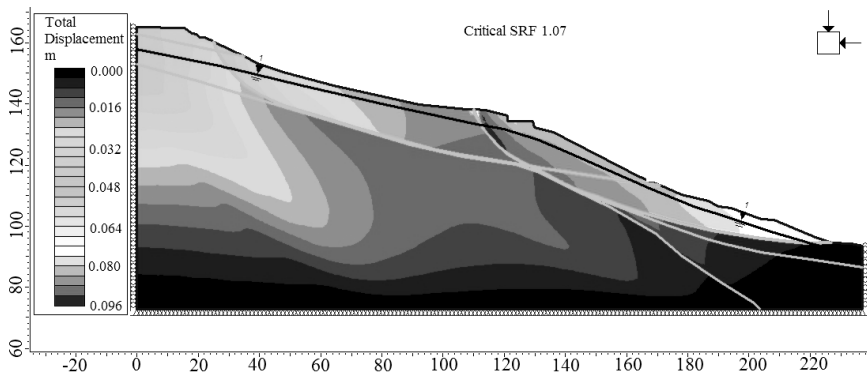


Рис. 5. Общие перемещения оползневой системы

Максимальные сдвиговые деформации приурочены к ослабленной прослойке грунтового массива – зоне скольжения. Наибольшие величины деформаций наблюдаются на начальном участке зоны скольжения ($\varepsilon = 0,96$), в головной части нижележащего оползневого тела затухая к базису разгрузки системы.

Вычисленное критическое значение *КСП* (*Critical SRF*), которое составляет 1,07, подтверждает то, что оползневая система находится на пределе устойчивости.

Говоря о пределе устойчивости оползневой системы и анализируя полученные результаты моделирования,

возникает вопрос вероятности разрушения оползневого склона. Насколько вычисленный коэффициент устойчивости является правомерным и точно определенным, учитывая разнородность, изменчивость грунтового массива и не совершенность методов определения физико-механических параметров.

В простейшем случае, когда в замкнутом виде аналитические решения доступны и когда входные параметры являются независимыми и некоррелированными, распространение ошибки можно аппроксимировать с использованием первого порядка ряда Тейлора. Тем не менее, такой подход требует извлечения частной производной для решения функции. Это не всегда возможно и очевидно невозможно, когда решение проблемы находится путем численного метода, такого как метод конечных элементов (МКЭ) [11].

Однако предложенный E. Rosenblueth *point estimate method* (РЕМ) позволяет использовать его совместно с МКЭ (FEM) для использования в вероятностном анализе при оценке потери устойчивости массива горных пород [10].

Реализованный в инженерной программе геотехнического анализа Phase² комбинированный метод РЕМ/FEM для вероятностного анализа (*Probabilistic analyses*) совместно с алгоритмом SSR, позволяет определить главный критический КСР (*Mean Critical SRF*), критическое стандартное отклонение КСР (*Std. Dev. Critical SRF*) и процентную вероятность разрушения (*Probability of failure, PF*).

При статистической обработке лабораторных данных, после выполнения сдвиговых испытаний образцов грунта, определено стандартное отклонение основных физико-

механических параметров оползневого массива и зоны скольжения (табл. 3).

В результате выполненного моделирования, получена область подверженная максимальным сдвиговым деформациям с максимальными значениями перемещений $U_{xy} = 0,084$ м (участок А-Б). Так же определены направления векторов перемещений (рис. 6).

Стандартное отклонение характеристики грунтового массива

№	Наименование инженерно-геологических элементов	Стандартное отклонение		
		Плотность γ , кН/м ³	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , град
1	ИГЭ-1	0,6	0,001	2
2	ИГЭ-2	0,7	0,003	1
3	ИГЭ-3	0,4	0,015	3
4	ИГЭ-4	0,6	0,006	3
5	ИГЭ -5	0,9	0,01	1
6	ИГЭ -6	0,7	0,005	2

Вычисленный главный критический $KСП = 1,04$, показывает снижение запаса устойчивости с 1,07 до 1,04 д.ед, что в условиях опасного в сейсмическом отношении региона является весьма значительной величиной. Стандартное отклонение критического $KСП$ составляет 0,17 д.ед. Определена вероятность разрушения (потери устойчивости) оползневой системы $PF = 41,7\%$, это свидетельствует о том, что оползневая система потеряет свою устойчивость в 42 случаях из 100 при естественном состоянии склона.

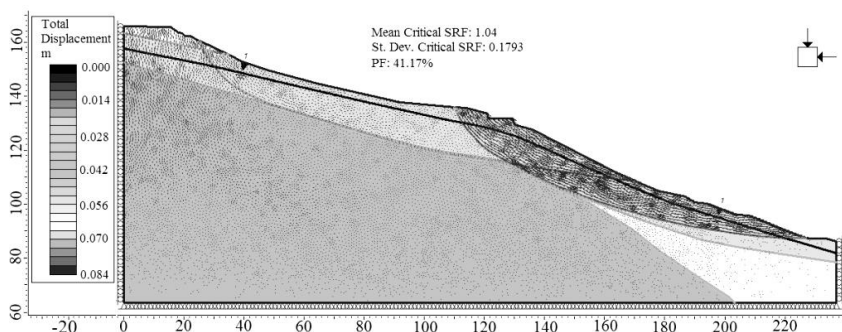


Рис. 6. Направления векторов перемещений оползневой системы

Результаты. Согласно результатам численного моделирования геомеханической устойчивости оползневого склона получены зоны напряжений с максимальными сдвиговыми деформациями ($\varepsilon = 0,96$).

Установленный характер регрессивных смещений и пространственно-геометрическое положение натуральных деформаций в полной мере подтверждается результатами моделирования.

Максимальные смещения оползневой системы составляют $U_{xy} = 0,096\text{м}$ в районе головной части нижнего оползневого тела, уменьшаясь к базису разгрузки. Коэффициент снижения прочности при условии полной статистической обработки, по результатам инженерно-геологических изысканий, равен $KСП = 1,07$.

Моделирование оползневой системы с помощью комбинированного метода РЕМ/ФЕМ показало снижение запаса устойчивости $KСП$ на 3%.

Примененный вероятностный анализ, дал возможность определить величину возможного процента потери устойчивости $PF = 41,7\%$.

Выводы. Численное моделирование дало возможность проанализировать напряженно-деформированное состояние оползневой системы, установить характер и закономерности ее деформирования.

Сравнение результатов между стандартным методом расчета и методом РЕМ/FEM показало значительное влияние структурных особенностей оползневого массива на результаты определения коэффициента снижения прочности, что в некоторых случаях может стать решающим аспектом при разработке комплексов по инженерной защите оползнеопасных территорий.

Установленное значение вероятности потери устойчивости оползневой системы, в полной мере отражает развитие геодинамических процессов на склоне. Так же, значение *PF* должно учитываться при проектировании геотехнических сооружений и определения возможности эксплуатации оползнеопасных участков.

Для обеспечения долговременной устойчивости рассматриваемого участка целесообразно выполнить комплекс мероприятий по его инженерной защите и осуществлять регулярный мониторинг экзогенных геологических процессов.

Список литературы

1. Оползни и другие геодинамические процессы горноскладчатых областей Украины (Крым, Карпаты): Монография / Г.И. Рудько, И.Ф. Ерыш – К.: Задруга, 2006. – 624 с.. – Библиогр.: с. 596-620.
2. Билеуш А.И. Оползни и противооползневые мероприятия / А.И. Билеуш. – К.: Наукова думка, 2009. – 560 с.
3. Егунов К.В. Расчеты оползневых откосов и противооползневых сооружений с учетом сейсмических воздействий прямым динамическим методом / К.В. Егунов, П.А. Устинов // 36. наук.

пр. (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». - Вип. 75: в 2-х кн.: Книга 1. - Київ, ДП НДІБК, 2011. - С. 35-40.

4. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов / Л.А. Строкова // Известия Томского политехнического университета. №1. - Томск: ТПУ, 2008. - С. 69-74.

5. Оползни черноморского побережья Украины: Монография / А.Н. Лужецкий, И.Ф. Ерыш, А.А. Коджаспиров, П.Н. Науменко – М.: Недра, 1977. – 103 с.

6. Ковров А.С. Анализ некоторых теорий прочности применительно к оценке устойчивости откосов и бортов карьеров / А.Н. Шашенко, А.С. Ковров // Проблемы гірського тиску. – Донецьк: Донецький національний технічний університет. - 2010. № 18. - С. 5-26.

7. Кіріак К.К. Обґрунтування технологічних параметрів ін'єкційного закріплення зсувонебезпечних ґрунтових структур : автореф. дис. ... канд. техн. наук. : 05.15.09 / К. К. Кіріак ; ДВНЗ Дніпропетр. нац. гірн. унт. - Д., 2013. – 17

8. Griffiths, D.V., and P.A. Lane (1999). Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique, vol. 49, no. 3, pp. 387-403.

9. Rosenblueth, E. (1975) Point estimate for probability moments, in Proceeding of the National Academy of Sciences, Vol. 72 (10), pp. 3812-3814.

10. Hammah, R.E. and Yacoub, T.E. Curran, J.H. (2009) Probabilistic Slope Analysis with the Finite Element Method, the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium.

11. Wolff, T.F. 1996. Probabilistic slope stability in theory and practice, In Uncertainty in the Geologic Environment, ASCE, New York, 419-433.

Анотація. У статті розглядається механізм деформування зсувної системи, характерні особливості її зсуву. Визначення коефіцієнта стійкості, виходячи із структурних особливостей ґрунтового масиву. Ймовірність втрати стійкості.

Ключові слова: зсув, зсувна система, стійкість схилу, метод РЕМ/FEM, ймовірність втрати стійкості.

Annotation. The article discusses the mechanism of deformation of the landslide, the characteristics of its slumping. Determination of stability based on structural features of the soil mass. Probability of loss stability.

Key words: landslide, landslide system, the stability of the slope, the method of PEM/FEM, the probability loss of stability.

Стаття надійшла до редакції у листопаді 2013р.