

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ОХОРОНА ПРАЦІ

УДК [622.271.33:624.131.537].001.57

Е.А. Сдвижкова<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
А.С. Ковров<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
К.К. Кирияк<sup>2</sup>, канд. техн. наук

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г.Днепропетровск, Украина, e-mail: sdvizhkova@front.ru

2 – Центр научно-технических услуг „ИНЖЗАЩИТА“, г.Ялта, АР Крым, e-mail: konstaaantin@mail.ru

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ye.A. Sdvizhkova<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Tech.),  
A.S. Kovrov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
K.K. Kiriiaak<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Tech.)

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: sdvizhkova@front.ru

2 – Centre of Scientific and Technical Services “INZH ZASHCHITA”, Yalta, Autonomous Republic of Crimea, e-mail: konstaaantin@mail.ru

## GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF LANDSLIDE SLOPE STABILITY BY FINITE ELEMENT METHOD

Интенсивное использование природных ресурсов и наращивание темпов промышленного и гражданского строительства обусловило техногенную дестабилизацию геологической среды и активизацию опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) в регионах Украины, особенно в Крыму. В настоящее время на территории АР Крым ведется интенсивное освоение территорий под строительство рекреационных, гостиничных и жилых комплексов. Одной из самых значительных проблем на южном берегу Крыма (ЮБК) является оползнеопасная обстановка большинства участков, отводимых под застройку. Сложность оползней ЮБК заключается во множестве факторов, влияющих на их общую и локальную устойчивость. Развитие прикладных программ численного моделирования для решения геотехнических задач позволяет максимально точно определить влияние геомеханических и геодинамических факторов на устойчивость оползневых грунтовых массивов.

**Цель.** Геомеханическая оценка устойчивости оползневого склона г.Могаби (АР Крым) и обоснование эффективности применения средств инженерной защиты на основе метода конечных элементов.

**Методика.** В основу работы положено: комплексное исследование оползневого склона с использованием натурных наблюдений за оползневом процессом, инженерно-геологические изыскания геоморфологических и гидрогеологических параметров с учетом сложной геодинамической обстановки; численное моделирование устойчивости объекта в инженерных программах конечно-элементного анализа Plaxis и Phase2.

**Результаты.** Выполнено моделирование устойчивости оползнеопасного склона в программах конечно-элементного анализа Plaxis и Phase2. Определены коэффициенты запаса устойчивости оползневого склона с учетом геоморфологических параметров и физико-механических характеристик массива пород по критерию прочности Кулона-Мора.

**Научная новизна.** В результате численного моделирования геомеханических процессов в оползневом склоне определены значения максимальных сдвиговых деформаций и смещений в грунтовом массиве, обуславливающих возникновение оползня, что позволяет разрабатывать нормативную документацию по инженерной защите территорий от экзогенных и эндогенных геологических процессов.

**Практическая значимость.** Выполненный анализ геомеханической устойчивости оползневого склона позволил обосновать наиболее рациональный способ инженерной защиты объекта от экзогенных и эндогенных геологических процессов.

**Ключевые слова:** *устойчивость склонов, оползень, критерий прочности Кулона-Мора, коэффициент снижения прочности на сдвиг, коэффициент запаса устойчивости*

**Актуальность.** Развитие хозяйственного комплекса Украины происходит в условиях наращивания техногенной дестабилизации геологической среды,

следствием которой является дальнейшее увеличение количества кризисных явлений в экологических системах, в том числе активизация опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП), практически на всей территории государства.

Распространение оползневых процессов на ЮБК связано с совокупностью естественноисторических 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, нарушением работы существующих дренажных систем и изменением гидрогеологического режима, а также неконтролируемым размещением промышленных и бытовых отходов. В настоящее время в Крыму наступил пик региональной активизации оползневых процессов, который прогнозировался на 2012–2014 годы [1]. Все эти факторы обуславливают снижение устойчивости уже освоённых территорий и вновь отводимых под застройку, тем самым провоцируя развитие и распространение оползнеопасных процессов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Оползни ЮБК в различное время были изучены и систематизированы многими учеными. В работе И.Ф. Ерыша [2] представлены комплексные исследования по систематизации и микрорайонированию оползневой обстановки с учетом гидрологических и геоморфологических факторов. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния оползневого склона в естественных условиях проводился в работе [3]. Основные аспекты формирования оползневых отложений изучались и рассматривались Л.А. Аносовой [4]. Значительный интерес представляют работы по анализу геодезического мониторинга эффективности противооползневых мероприятий, позволяющие определять параметры смещений элементов инженерной защиты и склона в пространстве и во времени [5].

Для более глубокого изучения геомеханических процессов, имеющих место в грунтовом массиве, практический интерес представляет сравнительное численное моделирование оползневого склона с учетом геоморфологических и гидрологических особенностей в естественном состоянии и после закрепления грунтового массива.

**Формулирование целей и постановка задач.** Целью данной работы является геомеханическая оценка устойчивости оползневого склона г.Могаби (АР Крым) и обоснование эффективности применения средств инженерной защиты на основе метода конечных элементов. Для ее выполнения поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать геомеханическую ситуацию и выполнить сравнительную оценку устойчивости оползневого склона в инженерных программах конечно-элементного анализа PLAXIS и Phase2 с учетом геоморфологических особенностей структуры массива пород по критерию Кулона-Мора.
2. Обосновать целесообразность и эффективность инженерной защиты оползневого склона.

**Изложение основного материала.** Участок исследований расположен юго-западнее г.Ялта, на северном склоне г.Могаби, южнее пгт Виноградное, к югу от водохранилища „Могаби–2“, практически примыкая к последнему. В геоморфологическом отношении исследуемая территория расположена в пределах горного умеренно крутого склона северной экспозиции с абсолютными отметками поверхности 317–376 м. Непосредственно участок проектируемого строительства расположен в пределах восточной ветви оползневой системы №133 „Могаби–2“ с общим базисом разгрузки, приуроченным к руслу реки Учан-Су.

Рельеф склона сформирован древними и современными оползневыми и эрозионными процессами, а также сильно изменен в результате хозяйственного освоения территории, а именно – обустройства водохранилища „Могаби–2“, строительства жилых зданий и сооружений на прилегающей территории, подъездных дорог, организации поверхностного и подземного стоков, прокладки коммуникаций.

В геологическом строении исследуемой территории принимают участие коренные грунты таврической серии, перекрытые нерасчлененными верхне-четвертично-современными древнеоползневыми, современными оползневыми отложениями и грунтами техногенного генезиса (рис. 1).

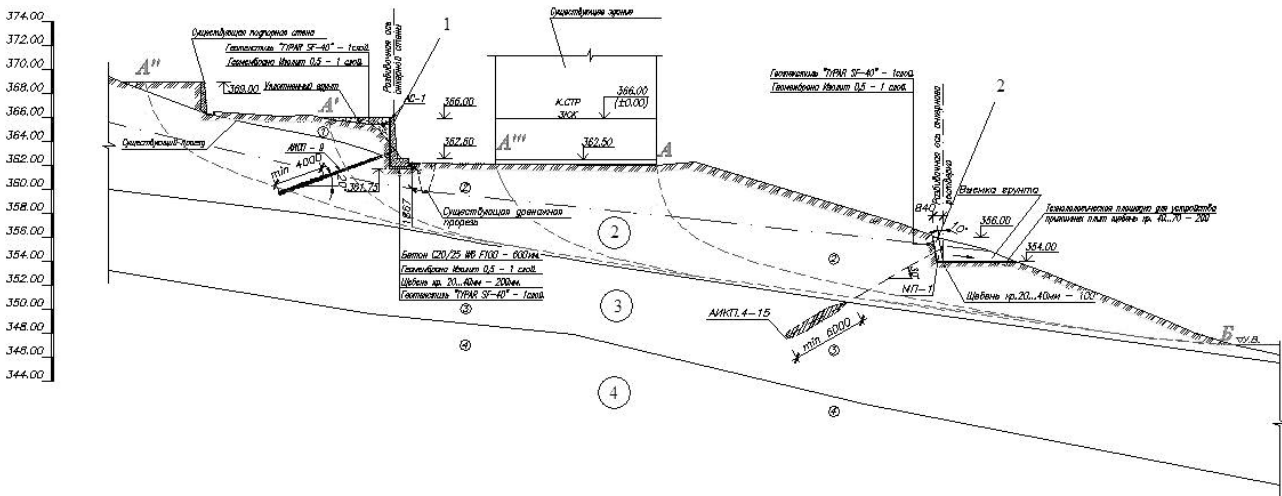


Рис. 1. Продольный разрез оползневого склона: 1 – насыпной грунт; 2 – Суглинок дресвянный, влажный; 3 – суглинок дресвянный, маловлажный; 4 – аргиллит с прослоями алевролитов и песчаников ; А, А', А'', А''', Б – точки начала и конца потенциальных поверхностей скольжения

Физико-механические характеристики грунтового массива

Наименование инженерно-геологических элементов	Плотность, $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Сцепление, $C$ , МПа	Угол внутреннего трения, $\varphi$ , град	Модуль деформации, МПа
ИГЭ-1 – насыпной грунт: щебень, суглинок древесно-щебенистый неоднородный	20,9	0,004	17	18
ИГЭ-2 – суглинок древесный, твердый, влажный (дресва и щебень аргиллита, алевролита и песчаника)	20,8	0,030	31	38
ИГЭ-3 – суглинок древесный, твердый, маловлажный (аргиллит мелкочешуйчатый, перемятый до суглинка древесного)	21,7	0,027	32	41
ИГЭ-4 – аргиллит с прослоями алевролитов и песчаников	22,6	0,020	35	49
ИГЭ -5 – зона скольжения	20,8	0,008	13	38

По результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных ранее на данной и прилегающей территории, в пределах исследуемого участка распространены инженерно-геологические элементы (ИГЭ), представленные в таблице.

Подземные воды в ходе инженерно-геологических изысканий, выполненных ранее, были вскрыты двумя разведочными скважинами, их установившийся уровень составил: 2,50 (скв. 1) и 5,0м (скв. 2). Подземные воды приурочены к суглинистым грунтам оползневого генезиса.

Грунтовые воды имеют поточно-струйчатый характер движения, не обладают напором и характеризуются спорадическим распространением. Насыпные грунты и верхняя зона суглинистых грунтов на момент исследований (февраль 2013 г.) сильно увлажнены за счет фильтрации поверхностных вод и отсутствия организованной системы сбора и отвода поверхностного стока.

В ходе инженерно-геологических изысканий было установлено, что оползневая территория характеризуется развитием регрессивных смещений вдоль оползневого склона с общим базисом разгрузки на водохранилище „Могаби-2“. Это обусловлено перепланировкой склона и увеличением техногенной нагрузки в головной части оползня при строительстве жилого комплекса.

Установившиеся медленные смещения развивают деформации в основании существующего сооружения и вызывают перераспределения масс по склону, вовлекая в движение более стабильные участки за счет уменьшения массы контрфорсной части. Следовательно, наибольший интерес для исследований представляет установленная инструментально (методом ЕИЭМПЗ) и визуально область, находящаяся в наиболее напряженном состоянии – зона скольжения по кривой А'''–Б (рис. 1).

Для сравнительной оценки геомеханической устойчивости оползневого склона рассматриваемого объекта использованы инженерные программы конечно-элементного анализа PLAXIS версии 8.2 компании PLAXIS Inc. (www.plaxis.nl) и Phase2 версии 7.0. компании Rocscience Inc. (www.rocscience.com).

По данным инженерно-геологических изысканий в вышеуказанных инженерных программах заданы геометрические параметры рассматриваемого объекта.

Область геометрической модели разбивалась на конечные элементы, а для инженерно-геологических сло-

ев присваивались физико-механические характеристики грунтового массива согласно данным, приведенным в таблице.

В качестве критерия прочности выбран критерий Кулона-Мора, часто используемый для оценки прочности грунтов и мягких пород. Прочностными характеристиками, входящими в условие прочности, основанное на прямолинейной огибающей предельных кругов главных напряжений, являются угол внутреннего трения  $\rho$  и сцепление  $C$ , либо пределы прочности на одноосное сжатие  $R_c$  и растяжение  $R_p$ . Линейное соотношение Кулона-Мора имеет вид

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

где  $\tau$  – напряжение сдвига;  $\sigma_n$  – нормальное напряжение. Критерий Кулона-Мора также может быть выражен в основных напряжениях как

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

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – наибольшее и наименьшее напряжения в массиве.

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

Программа PLAXIS представляет собой специализированную двухмерную компьютерную программу, основанную на методе конечных элементов, которая используется для расчетов деформаций и устойчивости различных геотехнических объектов. Реальная ситуация моделируется с помощью конечных элементов плоской деформации или осесимметричной модели. Расчет коэффициента устойчивости ( $\Sigma M_{sf}$ ) производится при помощи известного алгоритма снижения прочностных параметров (*Shear Strength Reduction Method*) для определения критического коэффициента устойчивости [6]. Параметры прочности грунта, входящие в условие Кулона-Мора ( $\tan \varphi$  и  $C$ ), последовательно уменьшаются до тех пор, пока не произойдет разрушение.

Для моделирования оползневого склона в программе PLAXIS выполнено построение геометрического расчетного профиля склона с разбивкой на конечные элементы плоской деформации.

Учет влияния сооружения на устойчивость оползневого склона производился, исходя из пространственно-геометрического расположения и его веса, который составляет  $58,8 \text{ кН/м}^2$  (как для трехэтажной конструкции).

В результате выполненных расчетов получены максимальные сдвиговые деформации, которые приурочены к ослабленной прослойке грунтового массива – зоне скольжения. Наибольшие величины деформаций наблюдаются на начальном участке зоны скольжения, в основании существующего сооружения, и развиваются по всей длине оползня до базиса его разгрузки (рис. 2).

Расчитанный коэффициент устойчивости, который составил  $M_{sf} = 1,006$ , и вычисленные общие смещения в грунтовом массиве  $Extreme U_{tot} = 0,028 \text{ м}$  свидетельствуют о том, что оползневой склон действительно находится на стадии медленных смещений в условии предельного равновесия, что не соответствует требованиям, которые регламентируются нормативной базой, действующей на территории Украины, как для степени ответственности сооружения СС-2 [2].

Для восприятия оползневого и активного давления грунта ( $294,0 \text{ кН/м}$ ) и обеспечения нормативной устойчивости оползневого склона ( $K_{зап} = 1,16$ ), запроектированы анкерные, удерживающие конструкции. Подпорная стена с жестким предварительно напряженным анкером с усилием  $98,0 \text{ кН/м}$  воспринимает активное давление грунта и обеспечивает устойчивость площадки выше существующего сооружения (рис. 1). Монолитная железобетонная плита прижата к слону инъекционным канатным анкером с расчетным усилием в тяге  $515,48 \text{ кН/м}$  (рис. 1, 3).

После проведения повторных расчетов с учетом удерживающих конструкций получен коэффициент устойчивости, отвечающий нормативным требованиям  $M_{sf} = 1,421$  (рис. 5). Максимальные общие перемещения составили  $Extreme U_{tot} = 0,013 \text{ м}$  в районе задней грани анкерной плиты, а в остальной части склона наблюдается стабилизация перемещений. Таким образом, запроектированные конструкции выполняют функцию инженерной защиты и стабилизируют оползневой склон, обеспечивая нормативный коэффициент запаса устойчивости оползневой территории.

Программа конечно-элементного анализа Phase2 также позволяет моделировать геомеханические процессы, происходящие в грунтовом массиве на основе различных моделей деформационной среды и теорий прочности. В программе используется итерационный алгоритм снижения прочностных параметров путем введения корректирующего (ослабляющего) коэффициента ( $SRF$ , *Strength Reduction Factor*). Целью расчетов является определение критического значения коэффициента снижения прочности ( $KСП$ ), при котором происходит сдвиг массива.

Коэффициент снижения прочности ( $KСП$ ) имеет тот же смысл, что и коэффициент запаса устойчивости  $M_{sf}$ , используемый в программе PLAXIS. Процесс вычислений  $KСП$  повторяется до момента потери отко-

сом устойчивого состояния, которое в численной процедуре метода конечных элементов соответствует моменту скачкообразного прироста сдвиговых деформаций и отсутствию сходимости решения определяющей системы уравнений. Локализация наибольших сдвиговых деформаций дает наиболее вероятную линию (поверхность), по которой происходит сдвиг массива, то есть возникает оползень. Полученную линию (поверхность) идентифицируют как линию (поверхность) скольжения.

В отличие от большинства методик, алгоритм, реализованный в Phase2, использует для вычисления КСП не только критерий Кулона-Мора, но и хорошо апробированный критерий Хоека-Брауна [7].

Профиль оползневого склона в Phase2 смоделирован таким образом, чтобы все детали продольного разреза (рис. 1) были отражены с такой же точностью, как и в программе PLAXIS.

Результатом последовательного нагружения модели и итерационных вычислений является определение местонахождения потенциальной поверхности скольжения в грунтовом массиве и зон максимальных сдвиговых деформаций (*shear strain*), которые вычисляются по формуле

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2},$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$  – наибольшие и наименьшие главные деформации, которые для плоской задачи соответствуют значениям наибольшего и наименьшего напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

Для рассмотренной выше задачи коэффициент снижения прочности массива равен 1,0, что практически совпадает с аналогичными расчетами, выполненными в программе PLAXIS.

Области с максимальными сдвиговыми деформациями наблюдаются под частью фундамента трехэтажного здания ближе к началу склона ( $\varepsilon_{max} = 0,006 \dots 0,007$ ), а также в средней части склона на границе ИГЭ-2 и ИГЭ-3 (рис. 4). При этом намечаются контуры потенциальной линии скольжения, верхняя граница которой начинается под фундаментом здания на расстоянии 8 м от начала склона и распространяется вниз по склону до уровня воды (отм. 346 м).

Общие смещения в грунтовом массиве достигают значений  $U_{xy} = 0,013 \dots 0,017 \text{ м}$ , что соответствует инициации оползневого процесса в грунтовом массиве. Прохождение поверхности скольжения по ослабленной прослойке грунтового массива обусловлено большей плотностью суглинков ИГЭ-3, а также снижением прочностных характеристик слоя суглинков ИГЭ-2 в связи с влиянием грунтовых вод.

После выполнения мероприятий по инженерной защите склона с применением железобетонной монолитной плиты с канатным предварительно напряженным инъекционным анкером коэффициент запаса устойчивости принимает значение  $M_{sf} = 1,45$ , что близко по величине с результатами расчета, выполненного в программе PLAXIS (рис. 5).

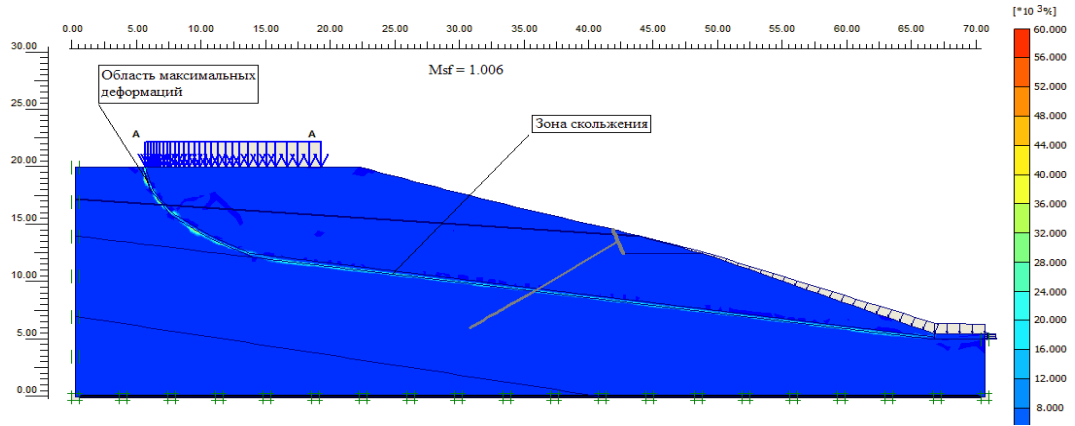


Рис. 2. Максимальные сдвиговые деформации в массиве до закрепления склона (Phase2)

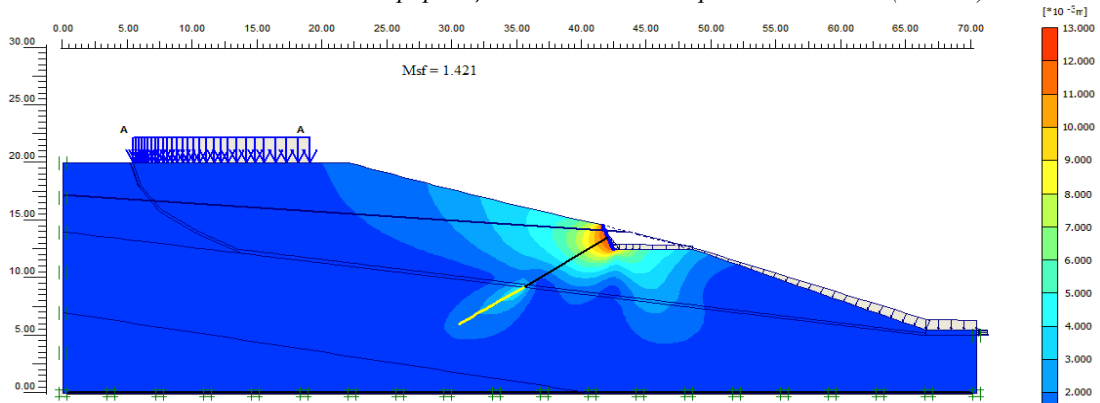


Рис. 3. Общие смещения в грунтовом массиве (после закрепления склона) (Phase2)

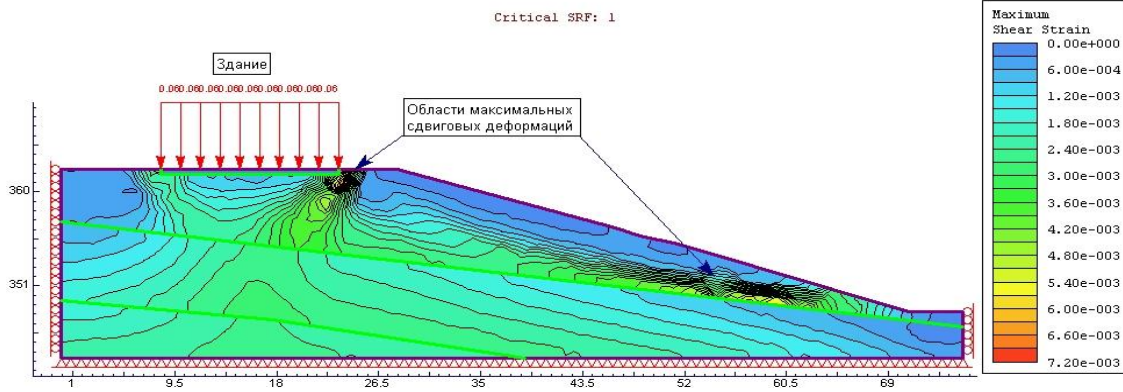


Рис. 4. Максимальные сдвиговые деформации в массиве до закрепления склона (PLAXIS)

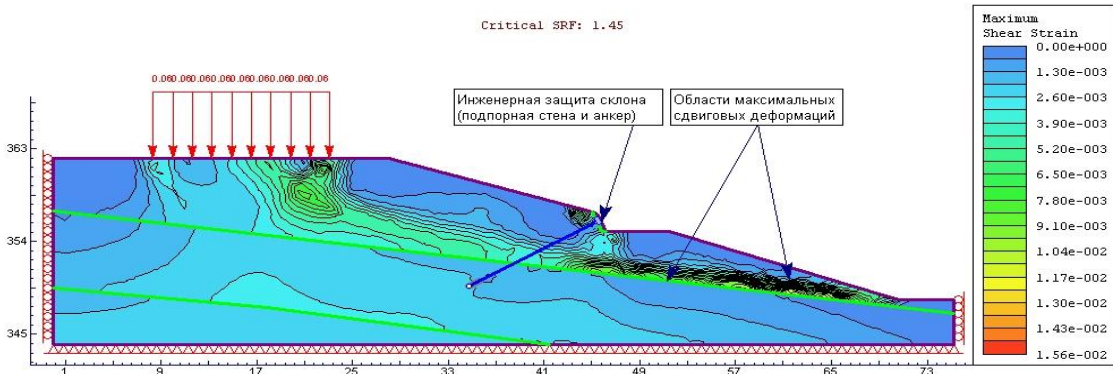


Рис. 5. Максимальные сдвиговые деформации в массиве после закрепления склона (PLAXIS)

Максимальные сдвиговые деформации под фундаментом здания в той части, которая граничит с верхней точкой откоса, уменьшаются до значений  $\varepsilon_{\max} = 0,003 \dots 0,005$ .

**Результаты.** Согласно результатам численного моделирования геомеханической устойчивости оползневого склона, коэффициенты запаса устойчивости до выполнения инженерной защиты составили 1,006 и 1,0 в программах PLAXIS и Phase2 соответственно. Таким образом, моделирование с использованием альтернативных алгоритмов показало, что склон находится в состоянии предельного равновесия.

Для обеспечения нормативной устойчивости склона ( $K_{\text{зап}}=1,16$ ) запроектированы анкерные удерживающие конструкции в виде монолитной железобетонной плиты с канатным предварительно напряженным анкером с расчетным усилием 343,6 кН/м.

После проведения мероприятий по инженерной защите коэффициенты запаса устойчивости увеличились до значений 1,421 и 1,45 в программах PLAXIS и Phase2 соответственно, что свидетельствует об эффективной стабилизации оползневого склона.

**Выводы.** Численное моделирование, выполненное эффективным и хорошо апробированным методом конечных элементов, позволило оценить напряженно-деформированное состояние оползневого склона. Использование альтернативных вычислительных программ обеспечило высокую достоверность определения геомеханических параметров процесса сдвижения оползневого склона. Полученные значения коэффициента устойчивости склона в естественном состоянии и после его закрепления находятся в сопоставимых пределах. Это дало возможность с высоким уровнем надежности обосновать принятые меры инженерной защиты и подтвердить их целесообразность.

Таким образом, применение численного моделирования деформационных процессов в грунтах под ответственными объектами гражданского строительства является необходимым элементом обоснования технических решений по защите сооружений.

Геомеханический анализ рассматриваемого объекта с использованием современного программного обеспечения подтвердил, что применение анкерных удерживающих конструкций является эффективным способом инженерной защиты склона от оползневых процессов.

Несмотря на положительные результаты по закреплению склона, проблемным является участок склона ниже удерживающих конструкций по контакту слоев ИГЭ-2 и ИГЭ-3, где максимальные деформации возрастают до значений  $\varepsilon_{\max} = 0,010 \dots 0,014$ . Для обеспечения долговременной устойчивости рассматриваемого объекта целесообразно осуществление регулярного мониторинга экзогенных геологических процессов.

#### Список литературы / References

1. Рудько Г.И. Оползни и другие геодинамические процессы горноскладчатых областей Украины

(Крым, Карпаты): монография / Г.И. Рудько, И.Ф. Ерыш – К.: Задруга, 2006. – 624 с.

Rudko, G.I., Yerysh, I.F. (2006), *Opolzni i drugie geodinamicheskie processy gornoskladchatykh oblastei Ukrainy (Krym, Karpaty)* [Landslides and Other Geodynamic Processes of Folded Mountains in Ukraine (Crimea, Carpathian Mountains)], Zadruga, Kiev, Ukraine.

2. Державні будівельні норми України. ДБН В.1.1-24:2009. Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проектування. Видання офіційне. – К.: Мінрегіонбуд України. 2010. – 50 с.

*Derzhavni budivelni normy Ukrainy. DBN V.1.1.-24:2009. Zakhyst vid nebezpechnykh geologichnykh processiv. Osnovni polozhennya proektuvannya* [State Construction Standards of Ukraine. DBN V.1.1.-24:2009. Protection From Hazardous Geological Processes. General Provisions for Design. Official Issue], Minregionbud Ukrainy, Kyiv, Ukraine.

3. Кирияк К.К. Моделирование оползневого склона методом конечных элементов: сб. науч. трудов / К.К. Кирияк // Донбасский государственный технический университет. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – Вып. 35. – С. 257–266.

Kiriak, K.K. (2011), “Modeling landslide-prone slope by finite element method”, *Proceedings of Donbass state technical university*, Vol. 35, pp. 257–266.

4. Аносова Л.А. Закономерности формирования оползневых отложений / Аносова Л.А., Коробанова И.Г., Копылова А.К. – М.: Изд-во „Наука“, 1996. – Т. 1. – 184 с.

Anosova, L.A., Korobanova, I.G., Kopylova, A.K. (1996) *Zakonomernosti formirovaniya opolznevyykh otlozheniy* Tom 1. [Laws of Landslide Deposits Formation. Vol. 1.], Nauka, Moscow, Russia.

5. Зуска А.В. Применения геодезического мониторинга эффективности защитных сооружений и состояния склонов балок с целью предотвращения оползневых процессов / А.В. Зуска, О.Л. Горбатов // Научный вестник Национального горного университета. – 2010. – № 11–12. – С. 25–32.

Zuska, A.V., Gorbatykh, O.L. (2010). “Application of geodetic monitoring for protective structures effectiveness and the state of the slopes to prevent landslides”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no.11-12, pp. 25–32.

6. Griffiths, D.V., and Lane, P.A. (1999), “Slope stability analysis by finite elements”, *Geotechnique*, vol. 49, no. 3, pp. 387–403.

7. Hammah, R.E., Yacoub, T.E. and Gorkum, B.C., Curran, J.H. (2005), “The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion. American Rock Mechanics Association”, *Proc. of the 40<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics: Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions*, Alaska, Anchorage, pp. 255–260.

Інтенсивне використання природних ресурсів і нарощування темпів промислового та цивільного

будівництва зумовило техногенну дестабілізацію геологічного середовища та активізацію небезпечних екзогенних геологічних процесів (ЕГП) у регіонах України, особливо в Криму. У даний час на території АР Крим ведеться інтенсивне освоєння територій під будівництво рекреаційних, готельних і житлових комплексів. Однією з найбільш значних проблем на південному березі Криму (ПБК) є зсувонебезпечний стан більшості ділянок, що відводяться під забудову. Складність зсувів ПБК полягає в безлічі факторів, що впливають на їх загальну й локальну стійкість. Розвиток прикладних програм чисельного моделювання для вирішення геотехнічних задач дозволяє максимально точно визначити вплив геомеханічних та геодинамічних факторів на стійкість зсувних ґрунтових масивів.

**Мета.** Геомеханічна оцінка стійкості зсувного схилу г.Могабі (АР Крим) та обґрунтування ефективності застосування засобів інженерного захисту на основі методу скінчених елементів.

**Методика.** В основу роботи покладено: комплексне дослідження зсувного схилу з використанням натурних спостережень за зсувним процесом, інженерно-геологічні вишукування геоморфологічних і гідрогеологічних параметрів з урахуванням складної геодинамічної обстановки; чисельне моделювання стійкості об'єкта в інженерних програмах скінченно-елементного аналізу Plaxis і Phase2.

**Результати.** Виконане моделювання стійкості зсувонебезпечних схилів у програмах скінченно-елементного аналізу Plaxis і Phase2. Визначені коефіцієнти запасу стійкості зсувного схилу з урахуванням геоморфологічних параметрів та фізико-механічних характеристик масиву порід за критерієм міцності Кулона-Мора.

**Наукова новизна.** У результаті чисельного моделювання геомеханічних процесів у зсувному схилі визначені значення максимальних зсувних деформацій і зсувів у ґрунтовому масиві, що обумовлюють виникнення зсуву. Це дозволяє розробляти нормативну документацію з інженерного захисту територій від екзогенних і ендегенних геологічних процесів.

**Практична значимість.** Виконаний аналіз геомеханічної стійкості зсувного схилу дозволив обґрунтувати найбільш раціональний спосіб інженерного захисту об'єкту від екзогенних і ендегенних геологічних процесів.

**Ключові слова:** *стійкість схилів, зсув, критерій міцності Кулона-Мора, коефіцієнт зниження міцності на зсув, коефіцієнт запасу стійкості*

The intensive use of natural resources and increasing pace of industrial and civil construction has resulted

in the destabilization of man-made geological environment and hazardous activation of exogenous geological processes (EGP), in the regions of Ukraine especially in Crimea. Currently, in the Autonomous Republic of Crimea an intensive development of land use for the construction of recreational, hotels and residential complexes is occurred. One of the most significant problems on the Southern Coast of Crimea (SCC) is the landslide-prone state for the most of areas to be allocated for land development. The complexity of landslides in SCC consists in a variety of factors affecting their general and local stability. Development of specialized software for numerical modeling to solve geotechnical problems allows accurately determine the impact of geomechanical and geodynamic factors on the stability of landslide-prone soils.

**Purpose.** To estimate geomechanical stability of a slope in the vicinity of Mogabi mountain (Crimea region) and to justify the efficiency of engineering protection techniques application via finite element method.

**Methodology.** The paper is based on a comprehensive study of landslide-prone slopes based on field observations of landslide processes, geotechnical studies of geomorphological and hydrogeological parameters, numerical simulation of object stability in engineering finite element method software Plaxis and Phase2.

**Findings.** The modeling of landslide-prone slope stability is carried out in finite element method software Plaxis and Phase2. The safety factors for the landslide-prone slope with consideration of geomorphological parameters and physical-mechanical properties of the rock mass by the Mohr-Coulomb failure criterion are calculated.

**Originality.** As a result of numerical modeling of geomechanical processes in the landslide-prone slope the values of maximum shear strength and total displacements at the soil mass that cause landslide are determined. This allows develop standard documentation for engineering protection of lands from exogenous and endogenous geological processes.

**Practical value.** The analysis of geomechanical stability fulfilled for the landslide-prone slope allowed justify the most appropriate way for engineering protection of the object from exogenous and endogenous geological processes.

**Keywords:** *slope stability, landslide, the Mohr-Coulomb failure criterion, shear reduction factor, safety factor*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук  
О.М. Шашенком. Дата надходження рукопису  
28.06.13.*