

*Кириак К.К.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

У статті наведені результати моделювання зсувного масиву методом кінцевих елементів, аналіз його стану із застосуванням критеріального методу розрахунку. Розглядається зона ковзання, визначення дотичних напружень, район їх розповсюдження; виявлення елементів ґрунтового масиву схильних до розтягування, зрушування та підлеглим зусиллям руйнування; моделювання роботи зсувного масиву посиленого за допомогою методу струменевої цементації.

Ключові слова: *зсув, поведінка зсувного масиву, моделювання, метод кінцевих елементів, струнева цементація, район ковзання.*

В статье приведены результаты моделирования оползневого массива методом конечных элементов, анализ его состояния с применением шагово-итерационного метода расчета. Рассматривается зона скольжения, определение касательных напряжений, область их распространения; выявление элементов грунтового массива подверженных растягивающим, сдвигающим усилиям и разрушению; моделирование работы оползневого массива усиленного при помощи метода струйной цементации.

Ключевые слова: *оползень, поведение оползневого массива, моделирование, метод конечных элементов, струйная цементация, область скольжения.*

Актуальность проблемы. В развитии оползневых явлений ЮБК весьма существенной является форма склона. Характерными параметрами её определения служат высота склона и его крутизна. Необходимо учитывать, что наблюдаемый рельеф обуславливается совокупным воздействием всей естественно-исторической обстановки.

Для разработки методики проектирования параметров инъекционной стабилизации оползневых процессов на ЮБК, необходимо, в первую очередь, выполнить компьютерное моделирование оползневого склона с подробным описанием геоморфологических свойств, в естественном состоянии, и при учете работы грунта усиленного методом высоконапорного гидрорасчленения цементно-силикатным раствором.

Анализ предыдущих исследований. Одной из характерных особенностей современной науки является широкое применение численных математических методов и ПК в различных областях связанных с расчетом строительных конструкций, и тем более в расчетах задач по геомеханике [1, 2, 5, 6].

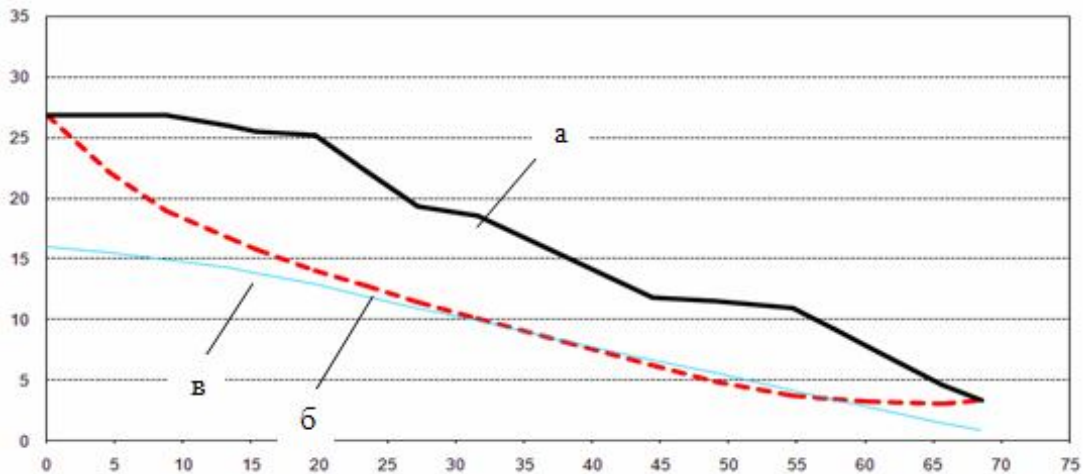
Процесс математизации науки и техники требует от специалистов в каждой области деятельности навыков применения ПК и использования для исследований IT-технологических методов расчета.

Решение современных задач строительной механики связано с использованием новых материалов, учета многих факторов, а также более сложных расчетных схем, близких к реальным конструкциям [3, 4]. Поэтому при исследовании напряженно-деформированного состояния, устойчивости и колебаний конструкций усложняется расчет и требует применения численных методов [1, 2]. Ранее численные математические методы для анализа напряженно-деформационного состояния оползневого склона не применялись.

Основная часть. Для моделирования оползневого массива применяется метод конечных элементов, при помощи программного комплекса «ПК ЛИРА-САПР». Для решения рассматриваемой задачи был выбран оползневой склон в районе г. Алушта. Исследование оползневой системы и инженерно-геологической ситуации были выполнены ЦНТУ «Инжзащита».

Исследуемая территория расположена в прибрежной части южного макросклона Крымских гор, на склоне юго-восточной экспозиции с отметками поверхности 3,2-27,7 м.

В геоморфологическом отношении исследуемая территория расположена в прибрежной части умеренно крутого склона юго-восточной экспозиции, осложненного овражно-балочной сетью, по которой, в основном, осуществляется поверхностный сток при выпадении атмосферных осадков на вышерасположенной территории. В геологическом строении исследуемой территории принимают участие флишевые породы таврической серии, перекрытые чехлом верхнечетвертично-современных накоплений делювиально-провиллюального, оползневого и техногенного генезиса. Глубина залегания кровли коренных грунтов в пределах участка, варьируется от 2-3 м до 12,5 -17,5 м относительно древней поверхности. Оползневой массив состоит из следующих инженерно-геологических элементов: ИГЭ1 – насыпной грунт техногенного происхождения, ИГЭ2 – несмещаемые породы Таврической серии приведены в таблице 1. Сейсмичность относится к зоне интенсивности сотрясений на средних грунтах равной 8-ми баллам. Форма оползневого склона приведены на рисунке 1.



а – поверхность существующего рельефа,
 б – зона скольжения,
 в – уровень грунтовых вод.

Рисунок 1 - Поперечный разрез оползневого склона

Методика расчета. Метод конечных элементов заключается в следующем. С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти, для численного анализа системы позволяет рассматривать его как одну из конкретных ветвей диакоптики – общего метода исследования систем путём их расчленения [2].

Для моделирования оползневого массива в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР» применялись конечные элементы плоской деформации грунтов (КЭ 281, 282, 284). Данные элементы учитывают специфику грунтов на основании зависимости Мора-Кулона для максимального касательного напряжения:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \leq -\sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_2) + 2C \cos \varphi, \quad (1)$$

где σ_1, σ_2 – главные напряжения;
 C – сдвиговое сцепление;
 φ – угол внутреннего трения.

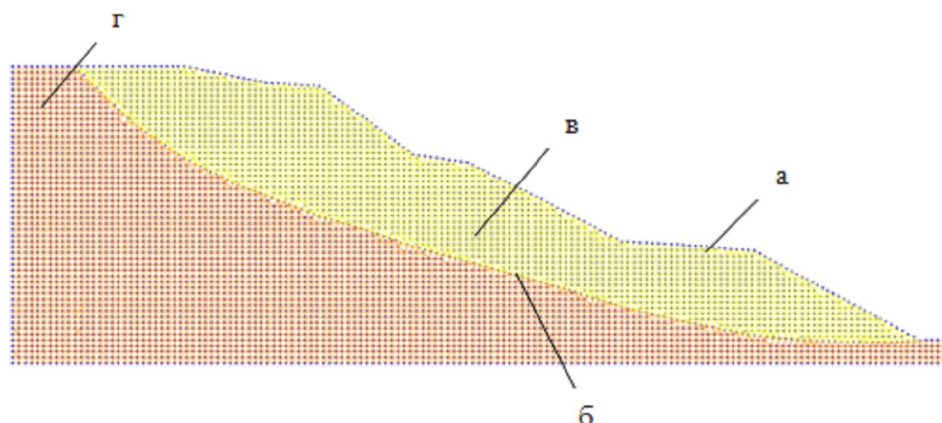
Моделирование оползневого массива. Признак схемы – шесть степеней свободы. Шаг триангуляции 0,5x0,5м. Связи в узлах – связь по оси $У$. Граничные контуры – связи по всем направлениям. Жесткости элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Жесткости элементов склона

№ п/п	$E, \text{т/м}^2$	ν	$H, \text{см}$	$R_0, \text{т/м}^3$	$C, \text{т/м}^2$	$R_t, \text{т/м}^2$	φ°	k_e
1(ИЭГ1)	1500	0,35	100	1,96	0,5	0,05	16	3
2(ИЭГ2)	4500	0,35	100	2,27	6	0,6	23	3
3	2500	0,2	100	2,1	3,5	0,35	25	3

Где обозначены: E – модуль деформации грунта по ветви первичного нагружения, ν – коэффициент Пуассона, H – толщина, R_0 – удельный вес грунта, k_e – коэффициент перехода к модулю деформации грунта по ветви вторичного нагружения $E_e = k_e * E$, C – структурное сцепление, R_t – предельное напряжение при растяжении, φ – угол внутреннего трения в градусах, при этом $\varphi < 90^\circ$; $C \geq R_t * \text{tg}\varphi$.

После построения склона и расчленения полученного оползневого массива на конечные элементы, расчетная модель приняла вид показанный на рисунке 2.



- а – поверхность существующего рельефа;
- б – предполагаемая плоскость скольжения;
- в – ИГЭ1;
- г – ИГЭ2

Рисунок 2 - Полученная модель оползневого склона

Так как оползневой массив моделируется в естественном состоянии, единственным нагружением для него будет собственный вес, который присваивается исходя из назначенных характеристик по ИГЭ-1,2 (табл.1). Для расчета полученной схемы моделируем нелинейное нагружение оползневого массива. Применяем шагово-итерационный метод. Задаем следующие параметры расчета, приведенные на рисунке 3.

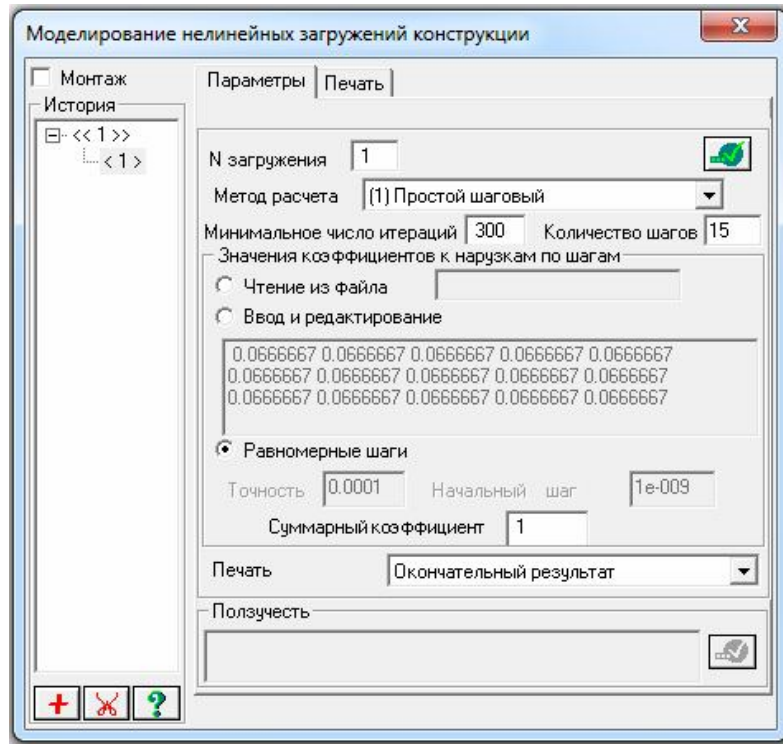


Рисунок 3 - Моделирование нелинейных нагрузений конструкции

На стадии выполнения расчета можно выделить 15 фаз смещения оползневого массива во времени. Так как оползень, исходя из расчета устойчивости, находится в состоянии предельного равновесия, наиболее значимой для моделирования является фаза общих медленных деформаций (рисунок 4) [4].

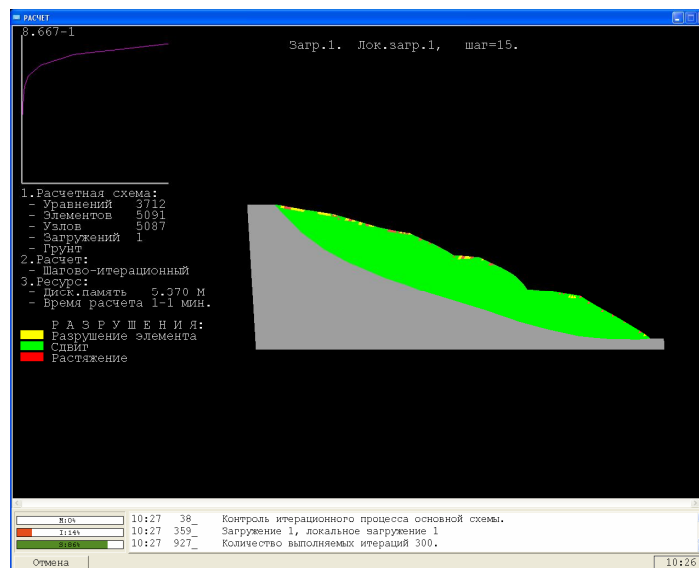


Рисунок 4 - Расчет оползневого массива шаг 15

Исходя из полученных результатов, на модели получены элементы оползневого массива подверженные растягивающим, сдвигающим усилиям и разрушению, которые выделены красным, зеленым и желтыми цветами (рисунок 4). Разрушение и растяжение элементов приурочено к поверхности естественного рельефа и показывает связь между натурными деформациями (заколами) склона и полученной моделью. Сдвиговые деформации распространены по всему оползневому массиву, что свидетельствует о вовлечении нестабильных масс грунта в движение и подтверждает характер происходящих медленных деформаций.

После выполнения расчета оползневого массива, рассмотрим полученные результаты по касательным напряжениям τ_{xz} (рисунок 5).

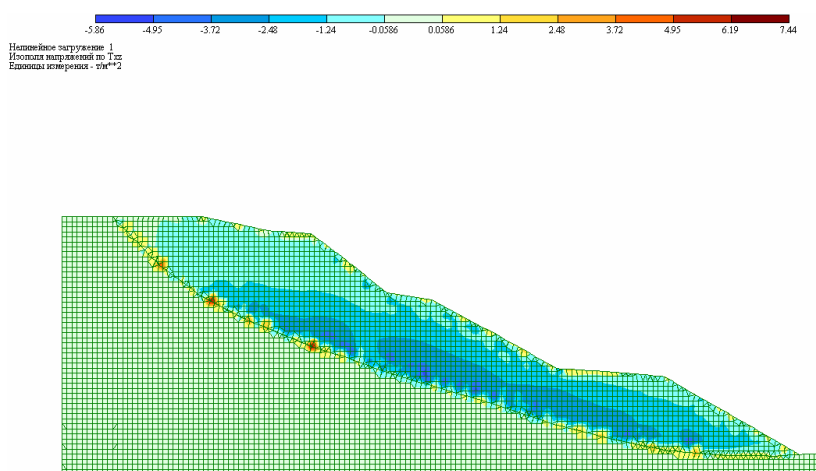


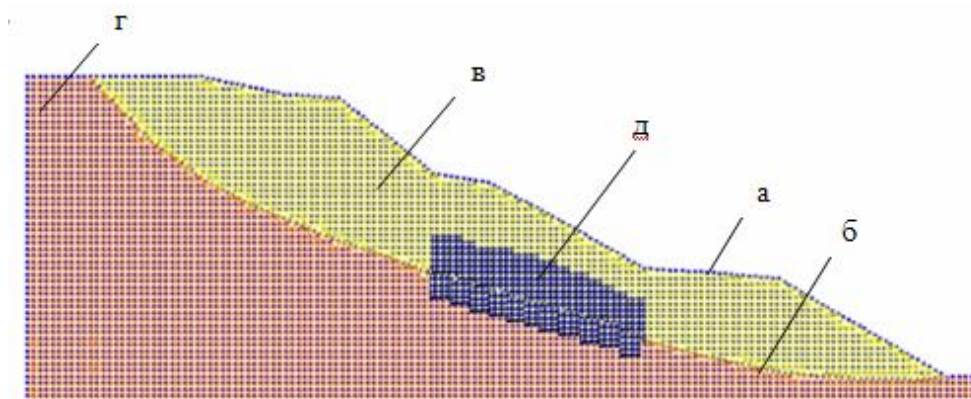
Рисунок 5 - Результаты расчета оползневого массива. Изополя напряжений τ_{xz} .

Максимальные величины касательных напряжений τ_{xz} концентрируются в головной части оползня, затухая к его середине и возрастая к базису разгрузки. В средней части наблюдается зона равновесия, где напряжения практически не возникают, за счет изменения градиента давления во времени. Будем считать, что на конце рассматриваемого участка градиент давления максимальный и его закон распространения близок к гармоническому.

Зона распространения напряжений относительно перпендикуляра к плоскости скольжения варьируются в пределах головной части от 0,7 до 1,6 метров ($\tau_{xz} = -0,5 \dots 21 \text{ т/м}^2$), в пределах средней части от 0,45...0,67 метров ($\tau_{xz} = -0,06 \dots -8,7 \text{ т/м}^2$) напряжения имеют отрицательный характер, в пределах языковой части от 0,4...0,78 метров ($\tau_{xz} = 0,34 \dots 11 \text{ т/м}^2$). В зависимости от стадии сдвижения область скольжения изменяет свои параметры и может быть описана вязкопластической реологической моделью [7].

Моделирование работы оползневого массива усиленного при помощи метода струйной цементации проводилось исходя из пространственно-геометрических и физико-механических характеристик. В соответствии с инженерно - геологическими условиями и технологической схемой нагнетания цементного раствора принимается следующая конструкция скважин: 0 – 8,0м – диаметр бурения 112мм; 0 – 8,0м – диаметр обсадки 75мм; плотность нагнетаемого раствора 1800 кг/ м³; шаг 1,5х1,5м.

При помощи метода струйной цементации достигается улучшение физико-механические свойства области скольжения. После проведения лабораторных исследований, в результате проведения инъекций, получаем новые характеристики для расчета (таблица 1, п.3). Скважины располагаем в зоне равновесия, где касательные напряжения имеют отрицательный характер. После моделирования оползневого массива и усиления его методом струйной цементации расчетная модель примет вид (рисунок 6).



- а – поверхность существующего рельефа;
- б – предполагаемая плоскость скольжения;
- в – ИГЭ1;
- г – ИГЭ2;

д – усиление грунта методом струйной цементации

Рисунок 6 - Полученная модель оползневого склона

На стадии выполнения расчета так же рассмотрим последнюю 15 фазу смещения (рисунок 7).

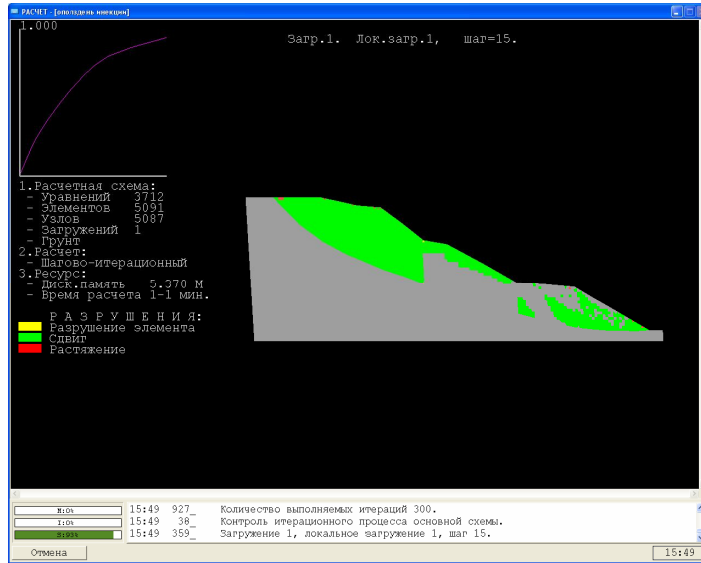


Рисунок 7 - Расчет оползневой массы усиленной при помощи метода струйной цементации шаг 15

Исходя из полученных результатов, на модели получены элементы оползневой массы подверженные растягивающим и сдвигающим усилиям. В зоне, где смоделировано закрепление грунтов методом струйной цементации сдвиг не происходит: растягивающие напряжения отсутствуют, а разрушения элементов нет.

После выполнения расчета оползневой массы, рассмотрим полученные результаты по касательным напряжениям τ_{xz} (рисунок 8).

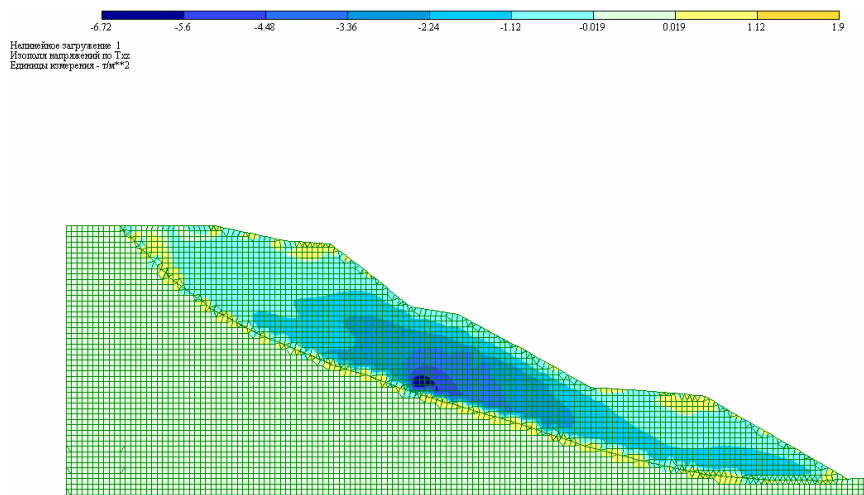


Рисунок 8 - Результаты расчета оползневой массы усиленной при помощи метода струйной цементации. Изополя напряжений τ_{xz}

Максимальные величины касательных напряжений τ_{xz} концентрируются в верхней части зоны усиления ($\tau_{xz} = 6,72 \text{ т/м}^2$), в головной и

языковой частях оползневого массива касательные напряжения τ_{xz} уменьшились в 5-11 раз по сравнению с моделью склона в естественном состоянии ($\tau_{xz} = 0 \dots 1,9 \text{ Т/м}^2$).

Для определения коэффициента устойчивости (k_{st}) оползневого массива усиленного при помощи метода струйной цементации выполним расчет устойчивости по методу проф. Г.М. Шахунянца при основном и особом сочетании нагрузок (сейсмическое воздействие, коэффициент сейсмичности $\mu=0,042$) (табл. 2).

Таблица 2 - Коэффициенты устойчивости (k_{st})

Условия	Основное сочетание (k_{st})	Особое сочетание (k_{st})
В естественном состоянии	1,00	0,88
После закрепления	1,35	1,19

После закрепления оползневого массива при помощи метода струйной цементации, при особом сочетании нагрузок, получен коэффициент устойчивости $k_{st} = 1,19$ при нормативном 1,10, что соответствует 3 степени ответственности сооружения. Это свидетельствует о стабилизации оползневого массива.

Выводы

1. Методом конечных элементов на модели обоснованно формирование областей в оползневом массиве подверженные растягивающим, сдвигающим усилиям и разрушению. Определена зона распространения касательных напряжений относительно перпендикуляра к плоскости скольжения.

2. На модели получено деформирование оползневого массива до и после применения метода высоконапорного гидрорасчленения цементно-силикатным раствором. Определены зоны сдвига и критические растяжения грунта; коэффициенты устойчивости оползневого массива в естественном состоянии до и после закрепления.

Библиографический список

1. Черный Г.И. О классификации математических моделей для различных задач механики горных пород / Г.И. Черный // "Труды VIII сессии Совета по народнохозяйственному использованию взрыва"- К.: Наукова думка, 1970. – С. 20 – 26.

2. Метод_конечных_элементов [Электронный ресурс] <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

3. Державні будівельні норми України. ДБН В.І.І-3-97. Інженерний захист територій будівель та споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. Видання офіційне. – К.: Держбуд України. 1998. – 40 с.

4. Рудько Г.И. Оползни и другие геодинамические процессы горно-складчатых областей Украины (Крым, Карпаты): монография / Г.И. Рудько, И. Ф. Ерыш. – К.: За друга, 2006. – 624 с.

5. Аносова Л.А. Закономерности формирования оползневых отложений / Л.А. Аносова, И.Г. Коробанова, А.К. Копылова. – М.: «Наука», 1976. – 184 с.

6. ЛИРА – САПР 2011:[учебное пособие] / Ю.В. Гензерский, Д.В. Медведевко, О.И. Палиенко, В.П. Титок. – К.: Электронное издание, 2011. - 396 с.

7. Должиков П.Н. Разработать методику проектирования параметров инъекционной стабилизации оползневых процессов ЮБК: НИР №2883 / П.Н. Должиков. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – 47 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.