

УДК 69:624.012.45

к.т.н. Емец Е. В.,
 Никишина И. А.,
 Коняшкина О. А.

(ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», Алчевск, ЛНР)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОГО МАССИВА, РАСПОЛОЖЕННОГО ВБЛИЗИ ОТКОСОВ

Приведены результаты исследования устойчивости грунтового массива, расположенного вблизи откоса, с использованием ПК «ЛИРА», предложены мероприятия по повышению устойчивости откосов.

Ключевые слова: устойчивость, грунтовый массив, оползни, откосы, моделирование, смещение грунтовых массивов, поверхности скольжения.

Актуальность проблемы. Потеря устойчивости части грунтового массива, сопровождающаяся разрушением сооружений, связана с формированием в массиве областей, где прочность грунта оказывается исчерпанной [1, 2].

Основными причинами потери устойчивости откосов и склонов являются:

– устройство недопустимо крутого откоса или подрезка склона, находящегося в состоянии, близком к предельному;

– увеличение внешней нагрузки (возведение сооружений, складирование материалов на откос или вблизи его бровки);

– изменение внутренних сил (изменение удельного веса грунта при изменении его влажности);

– неправильное назначение расчётных характеристик прочности грунта или снижение его сопротивления сдвигу за счёт повышения влажности и других причин;

– проявление гидродинамического давления, сейсмических сил, различного рода динамических воздействий (движение транспорта, забивка свай и т. п.) [3].

Оценка устойчивости массива грунтов основывается на анализе напряжений, возникающих в них от собственного веса и проектируемого сооружения, и сопоставлений с предельными их значениями.

Условие предельного равновесия в точке грунтового массива характеризуется

следующими выражениями теории предельного равновесия:

– для песка:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \sin \varphi; \quad (1)$$

– для глинистого грунта:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi. \quad (2)$$

Эти выражения позволяют дать оценку напряжённого состояния грунта, т. е. установить, находится ли грунт в допредельном или предельном состоянии, а следовательно, насколько устойчив массив.

Современное строительство в сложных инженерно-геологических условиях ставит более сложные задачи, связанные с количественной оценкой смещений грунтовых массивов. Решение таких задач возможно только на основании учёта упруго-пластического состояния грунтовых массивов, которое предшествует возникновению оползня.

Моделирование работы грунтовых массивов и расчёт их с использованием ПК «ЛИРА» позволяет обеспечить массивную обработку данных, исследовать деформации грунта, получить значения напряжений и перемещений в любой точке грунтового массива, определить возможную поверхность скольжения и, как следствие, оценить устойчивость склона.

Основная часть. Для моделирования оползневого массива применяется программный комплекс ПК «ЛИРА-САПР», в основу которого положен метод конечных элементов [4–6]. Результаты расчёта устойчивости грунтового массива с использованием ПК «ЛИРА» сравнивали с результатами расчёта по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Методика расчётов. В проектной практике применяются инженерные методы, содержащие различные упрощения [7].

Наиболее распространён метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Суть метода заключается в анализе устойчивости склона против сдвига по ряду возможных поверхностей скольжения, представленных дугой окружности с радиусом r и центром в точке O .

Согласно этому методу предполагается, что потеря устойчивости откоса может произойти в результате вращения отсека грунтового массива относительно некоторого центра.

На разрезе откоса, вычерченном в определённом масштабе, наносится серия возможных цилиндрических поверхностей скольжения (рис. 1).

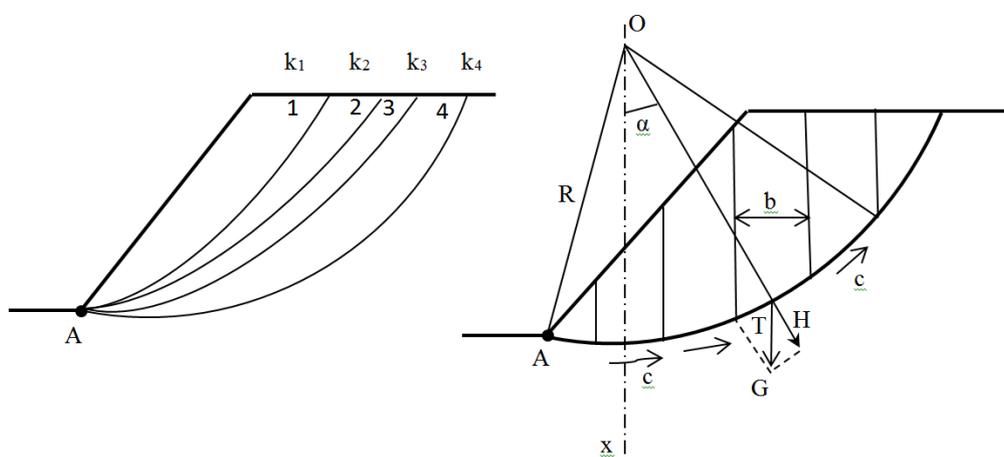


Рисунок 1 Схемы к расчёту устойчивости откоса

Отсек грунтового массива, ограниченный свободной поверхностью и поверхностью скольжения, разбивается вертикальными линиями на n элементов таким образом, чтобы можно было принять основание каждого отсека плоским, а прочностные характеристики постоянными.

Смещающийся массив рассматривается как недеформируемый отсек, все точки которого участвуют в общем движении.

Коэффициент устойчивости принимается в виде

$$k_{st} = \frac{M_{sr}}{M_{sa}}. \quad (3)$$

где M_{sr} и M_{sa} — моменты относительно центра вращения т. О всех сил, соответственно удерживающих и смещающих отсек.

Порядок вычислений:

1. Грунтовой массив разбивается на отдельные элементы.

2. Вычисляются вертикальные силы, действующие на каждый элемент: собственный вес грунта P_{gi} и равнодействующая нагрузки на его поверхности P_{qi} .

3. Равнодействующая сил $P_{gi} + P_{qi}$ раскладывается на нормальную N_i и касательную T_i составляющие:

$$N_i = (P_{gi} + P_{qi}) \sin \alpha_i. \quad (4)$$

4. Находим c и l_i — длину дуги.

Момент сил, вращающих отсек вокруг т. О:

$$M_{sa} = r \sum_{i=1}^n T_i = r \sum_{i=1}^n (P_{gi} + P_{qi}) \sin \alpha_i, \quad (5)$$

где n — число элементов в отсеке.

Сила трения:

$$\begin{aligned} T_i &= N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i = \\ &= (P_{gi} + P_{qi}) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где α — угол между нормалью к основанию i -го элемента и вертикалью;

$$l_i = \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \text{ — длина основания } i\text{-го эле-}$$

мента, где b_i — ширина i -го отсека; φ_i и c_i — расчётные значения характеристик прочности грунта в пределах основания i -го элемента.

$$k_{st} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^n c_i l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \alpha_i}. \quad (7)$$

При $k_{st} \geq k_{st}^H$ устойчивость откоса относительно выбранного центра вращения т. О обеспечена.

Коэффициент устойчивости часто принимается в виде

$$k_{st} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi'} = \frac{c}{c'}. \quad (8)$$

Для расчёта моделируем нелинейное нагружение оползневого массива. Применяем шагово-итерационный метод.

Результаты расчёта (напряжения и перемещения в каждой точке грунтового массива) сопоставлены с результатами расчёта по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Опаснейшей будет поверхность, для которой коэффициент устойчивости получится минимальным. Для обеспечения устойчивого положения откоса минимальный коэффициент устойчивости должен быть не менее 1,5. Если он окажется меньшим, необходимо сделать откос более пологим и повторить расчёты.

Результаты расчётов. Определение поверхности скольжения по методу круглоцилиндрических поверхностей предусматривает выполнение следующих шагов:

шаг 1: высота откоса 10,7 м; угол откоса 45° ; грунтовый откос разбиваем на 10 отсеков, каждый из которых шириной 1,67 м, расстояние от т. А до нейтральной оси 3,374 м (рис. 2);

шаг 2: высота откоса 10,7 м; угол откоса 45° ; грунтовый откос разбиваем на 10 отсеков, каждый из которых шириной 2,114 м, расстояние от т. А до нейтральной оси 5,798 м;

шаг 3: высота откоса 10,7 м; угол откоса 45° ; грунтовый откос разбиваем на 10 отсеков, каждый из которых шириной 2,889 м, расстояние от т. А до нейтральной оси 8,061 м.

Вес каждого из отсеков раскладываем на составляющие силы. Результаты расчёта приведены в таблице 1.

В результате расчёта получили, что откос из мягкопластичной глины устойчив при радиусе поверхности скольжения, не превышающем 16,7 м (рис. 2).

Для моделирования оползневого массива в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР» применялись конечные элементы плоской деформации грунтов (КЭ 281, 282, 284).

Расчёт производится шагово-итерационным методом, что позволяет учитывать перераспределение напряжений вследствие пластических деформаций грунта.

Моделируем вертикальный грунтовый откос. При этом были приняты следующие условия (рис. 3):

1) однородный грунт с характеристиками: модуль деформации $E = 20000 \text{ т} / \text{м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$; удельный вес $\gamma = 18 \text{ кН} / \text{м}^3$; удельное сцепление $C_n = 55,4 \text{ кПа}$; угол внутреннего трения $\varphi_n = 19,2^\circ$;

2) условия закрепления:

– по вертикальным боковым граням вырезанного массива запрещены горизонтальные перемещения;

– по нижней горизонтальной грани вырезанного массива запрещены вертикальные перемещения.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

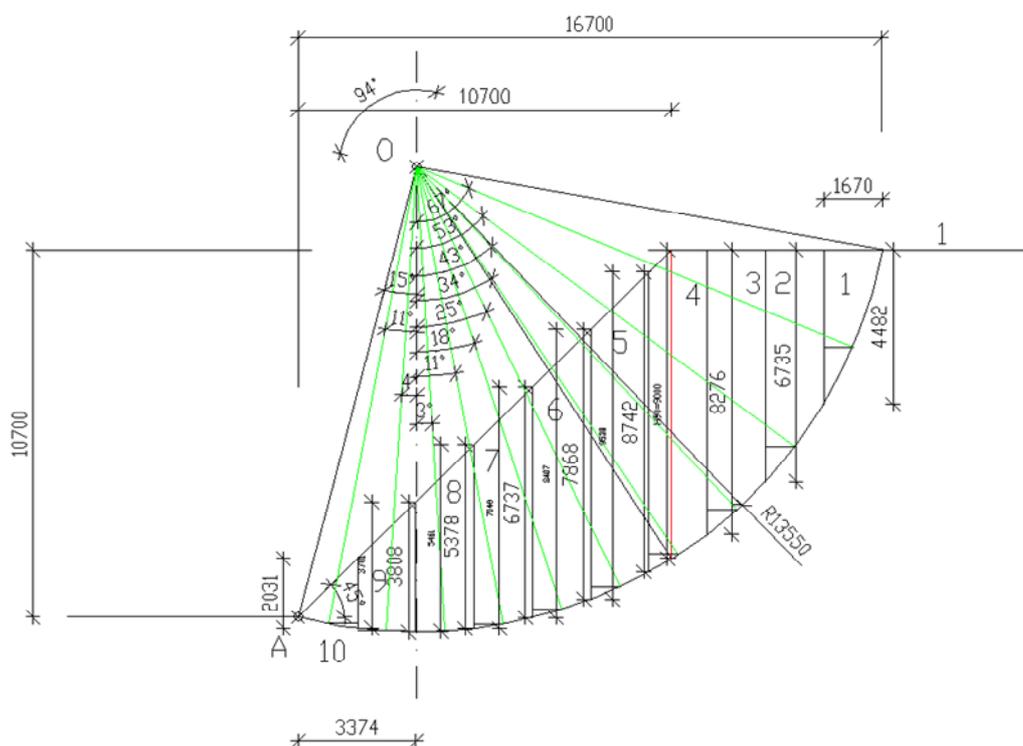


Рисунок 2 Расчётная схема грунтового массива по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Таблица 1

Результаты расчёта

Вес отсеков грунта, $G_1, \text{кН} / \text{м}$	Сдвигающая сила $T = G \sin \alpha, \text{кН} / \text{м}$	Нормальная составляющая веса $N = G \cos \alpha, \text{кН} / \text{м}$
шаг 1		
67,32	$T_1 = 67,32 \times \sin 67 = 61,968$	$N_1 = 67,32 \times \cos 67 = 26,3$
168,58	$T_2 = 168,58 \times \sin 53 = 134,63$	$N_2 = 168,582 \times \cos 53 = 101,454$
255,594	$T_3 = 255,594 \times \sin 43 = 174,31$	$N_3 = 255,594 \times \cos 43 = 186,93$
254,304	$T_4 = 254,304 \times \sin 34 = 142,205$	$N_4 = 254,304 \times \cos 34 = 210,82$
249,624	$T_5 = 249,624 \times \sin 25 = 105,495$	$N_5 = 249,624 \times \cos 25 = 226,23$
219,492	$T_6 = 219,492 \times \sin 18 = 67,826$	$N_6 = 219,492 \times \cos 18 = 208,75$
182,07	$T_7 = 182,07 \times \sin 11 = 34,74$	$N_7 = 182,07 \times \cos 11 = 178,72$
138,024	$T_8 = 138,024 \times \sin 3 = 7,22$	$N_8 = 138,024 \times \cos 3 = 137,83$
90,954	$T_9 = 90,954 \times \sin 4 = 17,354$	$N_9 = 90,954 \times \cos 4 = 89,28$
30,51	$T_{10} = 30,51 \times \sin 15 = 7,89$	$N_{10} = 30,51 \times \cos 15 = 29,47$
	$\sum T = 753,638$	$\sum N = 1395,784$
Коэффициент устойчивости:		
$k_{уст} = \frac{55,4 \times 22,17 + tg 19,2^\circ \times 1395,784}{753,938} = 2,27 > 1,5$		

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Продолжение таблицы 1

Вес отсеков грунта, $G_1, кН / м$	Сдвигающая сила $T = G \sin \alpha, кН / м$	Нормальная составляющая веса $N = G \cos \alpha, кН / м$
шаг 2		
89,406	$T_1 = 89,406 \times \sin 64 = 80,357$	$N_1 = 89,406 \times \cos 64 = 39,193$
226,35	$T_2 = 226,35 \times \sin 50 = 173,394$	$N_2 = 226,35 \times \cos 50 = 145,495$
309,31	$T_3 = 309,31 \times \sin 39 = 194,655$	$N_3 = 309,31 \times \cos 39 = 240,379$
365,79	$T_4 = 365,79 \times \sin 30 = 182,895$	$N_4 = 365,79 \times \cos 30 = 316,783$
402,57	$T_5 = 402,57 \times \sin 22 = 150,805$	$N_5 = 402,57 \times \cos 22 = 373,256$
385,48	$T_6 = 385,48 \times \sin 14 = 93,256$	$N_6 = 385,48 \times \cos 14 = 374,03$
318,83	$T_7 = 318,83 \times \sin 6 = 33,326$	$N_7 = 318,83 \times \cos 6 = 317,083$
238,98	$T_8 = 238,98 \times \sin 8 = 33,326$	$N_8 = 238,98 \times \cos 8 = 236,654$
149,38	$T_9 = 149,38 \times \sin 10 = 25,939$	$N_9 = 149,38 \times \cos 10 = 147,11$
52,845	$T_{10} = 52,845 \times \sin 17 = 15,45$	$N_{10} = 52,845 \times \cos 17 = 50,536$
	$\sum T = 983,33$	$\sum N = 2240,519$
Коэффициент устойчивости:		
$k_{уст} = \frac{55,4 \times 26,86 + tg 19,2^\circ \times 2240,519}{983,336} = 2,3 > 1,5$		
шаг 3		
105,066	$T_1 = 105,066 \times \sin 54 = 85$	$N_1 = 105,066 \times \cos 54 = 61,756$
281,673	$T_2 = 281,674 \times \sin 43 = 192,101$	$N_2 = 281,674 \times \cos 43 = 206,003$
405,213	$T_3 = 405,213 \times \sin 34 = 226,592$	$N_3 = 405,213 \times \cos 34 = 335,936$
494,945	$T_4 = 494,945 \times \sin 26 = 216,969$	$N_4 = 494,945 \times \cos 26 = 444,853$
558,791	$T_5 = 558,791 \times \sin 19 = 181,924$	$N_5 = 558,791 \times \cos 19 = 528,347$
600,38	$T_6 = 600,859 \times \sin 12 = 124,925$	$N_6 = 600,859 \times \cos 12 = 587,728$
589,281	$T_7 = 589,281 \times \sin 5 = 51,359$	$N_7 = 589,281 \times \cos 5 = 587,038$
444,98	$T_8 = 444,98 \times \sin 2 = 15,529$	$N_8 = 444,98 \times \cos 2 = 444,708$
281,957	$T_9 = 281,957 \times \sin 9 = 44,107$	$N_9 = 281,957 \times \cos 9 = 278,485$
97,291	$T_{10} = 97,291 \times \sin 16 = 26,817$	$N_{10} = 97,291 \times \cos 16 = 93,522$
	$\sum T = 1165,323$	$\sum N = 3568,376$
Коэффициент устойчивости:		
$k_{уст} = \frac{55,4 \times 33,376 + tg 19,2^\circ \times 3568,376}{1165,323} = 2,65 > 1,5$		

Размер области моделирования выбирался таким образом, чтобы потенциально возможная зона оползания находилась в пределах моделируемой области.

Размер конечных элементов варьировался в пределах от 2 до 0,5 м.

В результате расчёта устойчивости грунтового массива с использованием ПК «ЛИРА» получили значения перемещений, изополя напряжений в точках оползневого массива и расположение кривой скольжения, которые показаны на рисунке 4.

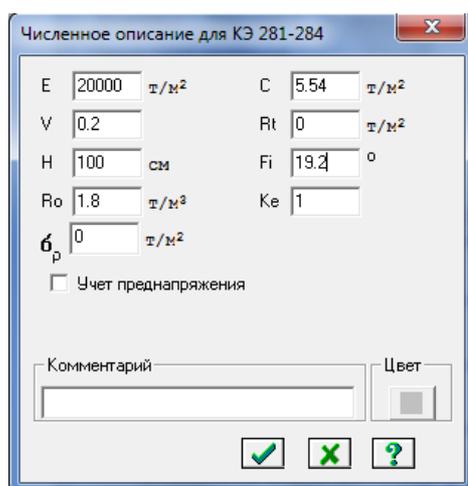


Рисунок 3 Моделирование грунтовых условий в ПК «ЛИРА»

В результате расчёта установлено, что радиус поверхности скольжения грунтового массива составляет 23 м.

В результате сравнения кривых скольжения по МКЭ в ПК «ЛИРА» и по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения установлено, что второй метод значительно завышает значения устойчивости (расхождение составляют почти 20 %).

Мероприятия по повышению устойчивости откосов и склонов. Одним из наиболее эффективных способов повышения устойчивости откосов и склонов является создание уступчатого профиля с образованием горизонтальных площадок (берм) по высоте откоса (рис. 5).

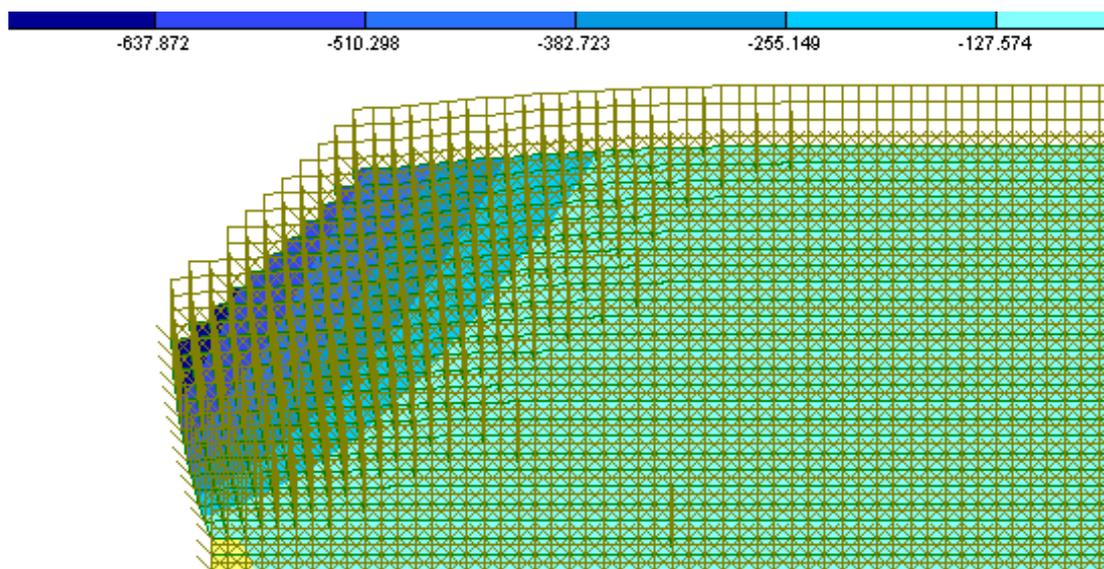
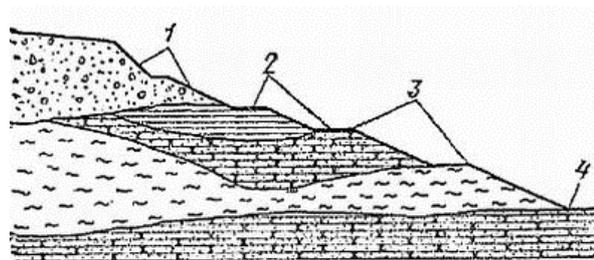


Рисунок 4 Перемещения по оси X, см

При относительно небольшой высоте откоса эффективна пригрузка подошвы в его нижней части или устройство подпорной стенки, поддерживающей откос. Закрепление поверхности откоса может быть осуществлено мощением камнем, укладкой бетонных плит.

Важнейшим мероприятием является регулирование гидрогеологического режима откоса или склона: устройство канав для перехватывания поверхностных вод, отвод воды с берм, устройство дренажа.



1 — уступ, 2 — берма, 3 — бровка уступа, 4 — подошва откоса

Рисунок 5 Откос уступчатой формы

Повышению устойчивости также способствуют такие конструктивные мероприятия, как прорезания потенциально неустойчивого массива грунтов системой забивных или набивных свай, анкерное закрепление во взаимодействии с подпорными стенками или свайными конструкциями.

Выводы:

1. Определены особенности моделирования грунтовых массивов при помощи физически нелинейных элементов.

2. Установлены преимущества прогнозирования устойчивости грунтового массива с использованием ПК «ЛИРА», заключающиеся в точности получаемых результатов.

3. В результате сравнения кривых скольжения по МКЭ в ПК «ЛИРА» и по методу круглоцилиндрических поверхно-

стей скольжения установлено, что метод скольжения завышает значения устойчивости почти на 20 %.

4. В результате расчёта модели грунтового основания со зданием, строящимся вблизи откосов, при помощи метода цилиндрических поверхностей скольжения было установлено, что откос из глины мягкопластичной устойчив для расчётных плоскостей скольжения и составил $k_{уст} = 2,27 > 1,5$ — для угла скольжения в 94° ; $k_{уст} = 2,3 > 1,5$ — для угла скольжения 97° ; $k_{уст} = 2,65 > 1,5$ — для угла скольжения 79° .

5. Предложены мероприятия по повышению устойчивости откосов и склонов.

Библиографический список

1. Методы расчёта и исследования зданий и оснований на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах [Текст] : сб. науч. тр. — К. : НИИСК Госстроя СССР, 1990. — 140 с.
2. Ройтман, А. Г. Деформации и повреждения зданий [Текст] / А. Г. Ройтман. — М. : Стройиздат, 1987. — 160 с.
3. Дружакина, О. П. Устойчивость грунтовых массивов [Текст] : учеб.-метод. пособие / О. П. Дружакина, К. В. Гаврилова. — Ижевск : Удмуртский университет, 2012. — 68 с.
4. Кирияк, К. К. Геомеханический анализ вероятности потери устойчивости оползневого склона методом конечных элементов [Текст] / К. К. Кирияк // Проблеми розвитку міського середовища. — 2014. — Вип. 2. — С. 281–297.
5. Метод конечных элементов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>.
6. Гензерский, Ю. В. ЛИРА-САПР 2011 [Текст] : учебное пособие / Ю. В. Гензерский и др. — К. : Электронное издание, 2011. — 396 с.
7. Методические рекомендации по расчёту устойчивости земляных сооружений и оползневых склонов при статических нагрузках. — К. : НИИСК, 1985. — 40 с.

© Емец Е. В.

© Никишина И. А.

© Коняшкина О. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПГС и А ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я., к.т.н., доц., и.о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.

Статья поступила в редакцию 03.10.19.

к.т.н. Ємець О. В., Нікішина І. О., Коняшкіна О. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ГРУНТОВОГО МАСИВУ, РОЗТАШОВАНОГО ПОБЛИЗУ УКОСІВ

Наведено результати дослідження стійкості грунтового масиву, розташованого поблизу укосу, з використанням ПК «ЛІРА», запропоновано заходи щодо підвищення стійкості укосів.

Ключові слова: стійкість, грунтовий масив, зсуви, укоси, моделювання, зсув ґрунтових масивів, поверхні ковзання.

PhD in Engineering Emets E. V., Nikishina I. A., Koniashkina O. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
INVESTIGATION OF SOIL MASS STABILITY NEARBY SLOPES

There have been given the results of investigation of soil mass stability nearby slope, using the PC “LIRA”, as well there have been proposed measures to improve the stability of slopes.

Key words: *stability, soil mass, landslides, slopes, modeling, soil mass displacement, sliding surfaces.*