

УДК 624.131

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУФФОЗИОННЫХ И ЭРОЗИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ

И. А. Садовенко, Н. И. Деревягина

Государственное высшее учебное заведение “Национальный горный университет”

просп. Карла Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49027, Украина. E-mail: natali.derev@gmail.com

На основании экспериментальных исследований оценены изменения, происходящие в лессовых породах при их насыщении и фильтрации грунтового потока. Серия испытаний фильтрационных параметров пород проведена в условиях трехосного сжатия при различных значениях нагрузок (геостатическое давление – в диапазоне 100–300 кПа, гидравлический градиент контролировался давлением в образце 20 кПа) и направлениях фильтрации, что соответствовало реальным условиям грунтового массива. По результатам экспериментов установлена инверсия фильтрационной анизотропии лессов в сравнении с ее природным положением, что следует отнести к техногенным изменениям грунтовых массивов. Значения относительной объемной деформации подтверждают процессы разрушения и перестройки структуры лессовой породы. При радиальной нагрузке 300 кПа наблюдается суффозия, переходящая в эрозионный размыв с предваряющей фазой формирования гидравлически инертных полостей. Описанные стадии качественно совпадают с визуальными наблюдениями формирования оползня течения на ж/м «Тополь» в г. Днепропетровск (1997 г.), что существенно обновляет методические подходы к прогнозированию подобных процессов.

Ключевые слова: суффозия, фильтрация, лессовые породы, эрозионный размыв.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУФОЗІЙНИХ ТА ЕРОЗІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЛЬОСОВИХ ПОРІД

І. О. Садовенко, Н. І. Деревягіна

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»

просп. Карла Маркса, 19, г. Дніпропетровськ, 49027, Україна. E-mail: natali.derev@gmail.com

На підставі експериментальних досліджень оцінені зміни, що відбуваються в льосових породах при їх насиченні і фільтрації грунтового потоку. Серія випробувань фільтраційних параметрів порід проведена в умовах тривісного стиску при різних значеннях навантажень (геостатичний тиск – у діапазоні 100–300 кПа, гідралічний градієнт контролювався тиском у зразку 20 кПа) і напрямках фільтрації, що відповідало реальним умовам грунтового масиву. За результатами експериментів встановлена інверсія фільтраційної анізотропії льосів порівняно з її природним становищем, що слід віднести до техногенних змін грунтових масивів. Значення відносної об'ємної деформації підтверджують процеси руйнування і перебудови структури льосової породи. При радіальному навантаженні 300 кПа спостерігається суфозія, що переходить в ерозійний розмив із випереджаючою фазою формування гідралічно інертних порожнин. Описані стадії якісно збігаються з візуальними спостереженнями формування зсуву течії на ж/м «Тополя» у м. Дніпропетровську (1997 р.), що істотно оновлює методичні підходи до прогнозування подібних процесів.

Ключові слова: суфозія, фільтрація, льосові породи, ерозійний розмив.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Теоретические и эмпирические предпосылки к проведению серии лабораторных исследований лессовых пород характерных для Приднепровья освещены нами в работе [1], где обозначен существенно новый подход в понимании и раскрытии механизма аварийной геодинамики упомянутых грунтов при современных условиях техногенного нагружения. Следствием этого являются аварийные деформации зданий, локальные провалы поверхности, оползни течения (например, масштабный оползень на территории ж/м «Тополь» города Днепропетровска в июне 1997 г.) [2, 3].

Анализ показал, что динамика деформационных процессов лессовых склонов формируется в результате сложного сочетания естественно-геологических и геодинамических факторов. Предложенная методика [1] моделирования устойчивости лессовых грунтов учитывает это сочетание в виде комплекса энергетической и механистической моделей, которые базируются на исходных параметрах стабильностных испытаний образцов грунта. Введенное понятие потенциала активации лессового массива и его количественные диапазоны создают предпосыл-

ки для прогнозного разделения различных фаз оползневых процессов.

Специфические свойства лессовых пород затрудняют прогноз их поведения, как при строительстве, так и в природных условиях, особенно при воздействии воды [4]. На данном этапе исследований оценивались изменения, происходящие в лессах при их насыщении и фильтрации грунтового потока, которые провоцируют процесс перехода структуры грунта в качественно новую, с изменением характера связей, а, соответственно, и новыми геомеханическими показателями.

Поэтому целью работы является установление пространственных закономерностей изменения фильтрационных и прочностных свойств лессовых пород во времени при заданных природных значениях геостатического давления с помощью прибора трехосного сжатия. Также для формирования представления о количественном характере гидродинамического режима и его изменениях при оползневом процессе, уделено внимание установлению зависимостей фильтрационных показателей лессовых пород от деформаций в различных частях оползневого тела [5, 6].

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІССЛЕДОВАНИЙ.

В процесі испытаний задавалися направлення фільтраційного потоку в ґрунті і положення самого образця по отношению к направлению потока с учетом максимального приближения реальним условиям оползневих масивів, где установлена существенная анизотропия [7]. Исследовалось воздействие на ґрунт фільтраційного потоку в направлении сверху вниз и перпендикулярно поверхностям наслоєний. Изучались образцы лессових порід четвертичного візта, отобранные на склонах балки Тоннельная и Тополиная (г. Днепропетровск). Форма образцов ґрунтів соответствовала геолого-структурному строєнию потенціальных оползневих тел и предполагаемому учету анизотропии свойств при испытаніях.

Для исследований использовалось оборудование трехосного сжатия TriSCAN (VJTech, Великобритания). Его преимущество (особенно для лессових порід) состоит в максимальном приближении гидрогеомеханических режимов испытаний образцов порід к реальным условиям состояния ґрунтов. Аппаратура позволяет производить автоматизирован-

ный контроль давления в камере нагружения, линейных и объемных деформаций образца, а также расход воды, проходящей через образец в режиме реального времени.

Серия испытаний фільтрационных параметров порід проведена в условиях трехосного сжатия при различных значениях нагрузок и направлениях фільтрации. Геостатическое давление принималось в диапазонах 100–300 кПа, гидравлический градиент контролировался давлением в образце и составлял 20 кПа, что соответствовало реальным условиям ґрунтового массива. Время испытанія составляло 24 часа. Перед проведением фільтрационного опыта производилось консолидационное доуплотнение образцов при нагрузках, которые отвечали геостатическому давлению, до условной стабилизации деформаций по действующим нормативам.

Первая серия испытаний проводилась в условиях фільтрации сверху–вниз. На рис. 1 приведены результаты лабораторных испытаній, которые показывают изменение коэффициента фільтрации лессових порід (K_f) во времени (t).

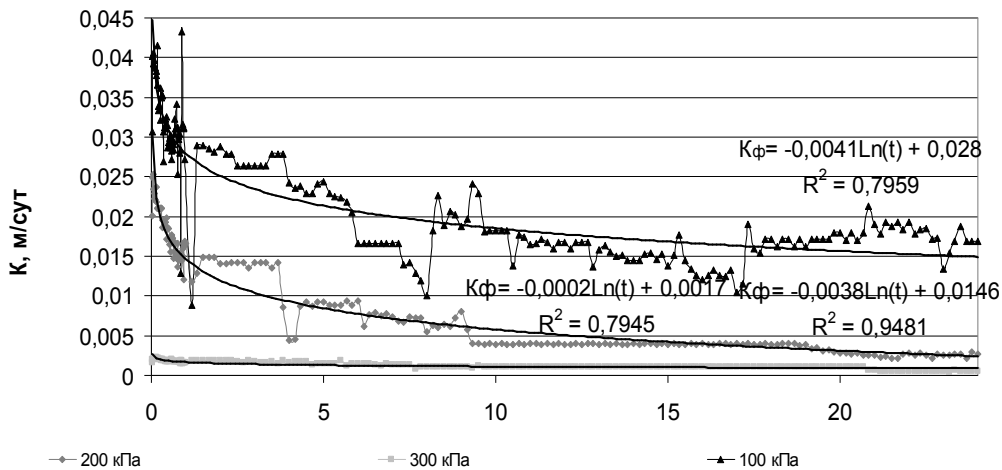


Рисунок 1 – Результати фільтраційних испытаній лессових порід четвертичного візта при направлении фільтрации сверху – вниз: 100, 200, 300 кПа – диапазон радіального навантаження ($\sigma_3 = \sigma_2$)

На рис. 1 прослеживается четкая зависимость уменьшения значения (K_f) при увеличении геостатического давления и неизменном значении гидравлического градиента. Значения K_f (при 100 кПа) изменяются от 0,008835 до 0,04325 м/сут, при $\sigma_3 = 200$ кПа – от 0,0021 до 0,0253 м/сут, при $\sigma_3 = 300$ кПа – от 0,0004 до 0,0023 м/сут. Наиболее интенсивные изменения происходят в первые 10 часов фільтрации, затем процесс приобретает затухающий характер. Статистическая достоверность определяется значениями $R^2=0,79...0,94$.

Анализ показывает, что перестройка структуры лесса происходит поэтапно.

Вначале, когда идет замачивание порід, разрушаются основные структурные связи в лессах. В дальнейшем, под воздействием фільтрационных процессов порід уплотняется, одновременно про-

должается вынос солей и нерастворимых частиц. Подтверждаются известные положения [4, 8], что структурные связи разрушаются из-за того, что силы взаимодействия между частицами лесса интенсивно снижаются с увеличением расстояния между ними.

Для перемещения частицы порід на какое-либо расстояние или на поверхность, требуется совершить определенную работу, которая может рассматриваться как энергия активации [1].

На рис. 2 показана близкая к логарифмической зависимость между относительной объемной деформацией и K_f во времени. Значения относительной объемной деформации подтверждают указанные процессы разрушения и перестройки структуры лессовой порід. Статистическая достоверность параметров значительна: $R^2=0,63...0,91$.

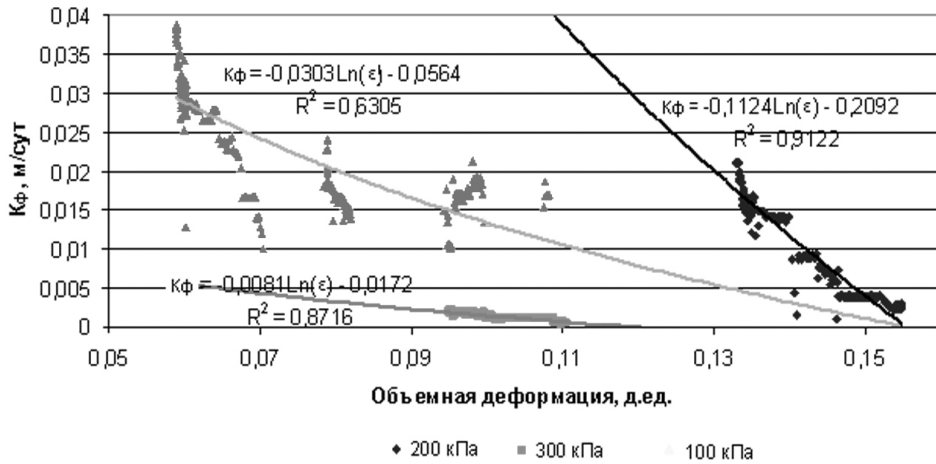


Рисунок 2 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород четвертичного возраста при направлении фильтрации сверху – вниз, при радиальных нагрузках 100, 200, 300 кПа

Изменение объемной деформации во времени характеризует рис. 3. Для исследования гидрогеомеханики горизонтальной фильтрации, образцы породы отбирались параллельно слоистости. На

рис. 4 приведены результаты лабораторных испытаний, которые показывают изменение коэффициента фильтрации лессовых пород (K_{ϕ}) во времени с учетом указанного направления фильтрации.

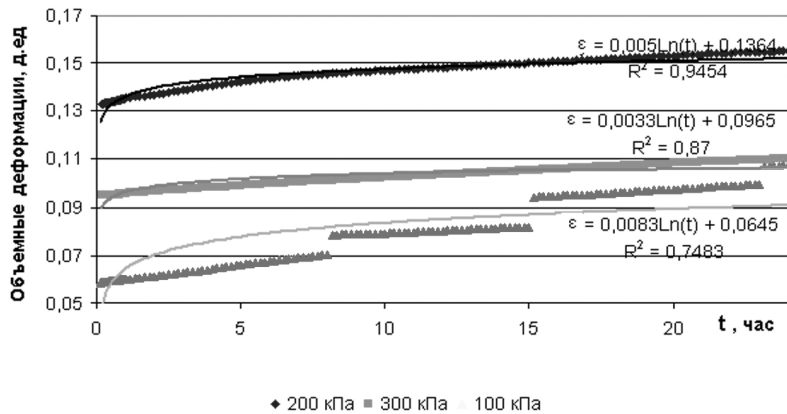


Рисунок 3 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород четвертичного возраста при направлении фильтрации сверху – вниз: 100, 200, 300 кПа – радиальные нагрузки

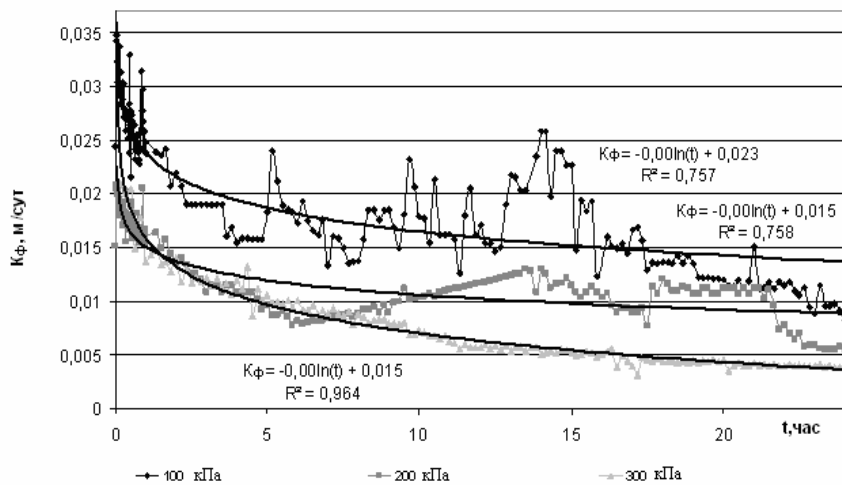


Рисунок 4 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород четвертичного возраста при направлении фильтрации параллельно напластованию: 100, 200, 300 кПа – диапазон нагружения

В данном случае значения K_f при $\sigma_3 = 100$ кПа изменяются от 0,0082 до 0,0347 м/сут, при $\sigma_3 = 200$ кПа – от 0,0054 до 0,0207 м/сут, при $\sigma_3 = 300$ кПа – от 0,0038 до 0,0209 м/сут. Статистическая достоверность оценивается значениями $R^2=0,75\dots0,96$.

Интересные результаты дает сравнение двух серий испытаний, например K_f для схемы сверху–вниз меньше, чем в горизонтальном направлении. Однако, при этом, для радиальной нагрузки 100 кПа (схема сверху вниз) верхнее значение K_f достигает 0,043 м/сут. Также не отмечается и относительно равномер-

ная фильтрация, как в предыдущем случае. Наблюдаются резкие скачки фильтрационных значений.

При проведении испытаний с радиальной нагрузкой $\sigma_3 = 300$ кПа, отмечены следующие особенности. В промежутке времени от трех до девяти часов во всех образцах породы (было использовано четыре образца) наблюдалась суффозия, переходящая в формирование эрозионных каналов (рис. 5). При меньших давлениях также наблюдалась суффозия, однако ее интенсивность была заметно слабее.



Рисунок 5 – Эрозионные каналы в образцах лессовых пород

Очевидно, из-за эрозионных промоин должны увеличиваться фильтрационные показатели грунта, однако (рис. 3) на обобщенной кривой результатов испытаний при $\sigma_3=300$ кПа этого не наблюдается. Возможным объяснением данного обстоятельства может быть существование двух стадий формирования эрозионной промоины. Вначале, за счет суффозии, образуется замкнутый канал, который не выполняет функций гидравлического проводника, а его стоковая поверхность инертна. В дальнейшем, при увеличении радиальных нагрузок до 300 кПа, которые превышают нейтральные напряжения внутри полости, происходит всплеск интенсивности

суффозии, и полость сообщается со стоковой зоной вне образца. Эта стадия соответствует переходу суффозии в глубинную эрозию. Описанные стадии предшествовали формированию упоминавшегося оползня течения на ж/м «Тополь» в г. Днепропетровск [5].

На рис. 6, где показана зависимость объемных деформаций и проницаемости образцов, наиболее тесной является корреляция для испытаний с радиальной нагрузкой 300 кПа. Заметно, что объемная деформация наиболее чувствительна к суффозионным и эрозионным процессам внутри грунтовых образцов.

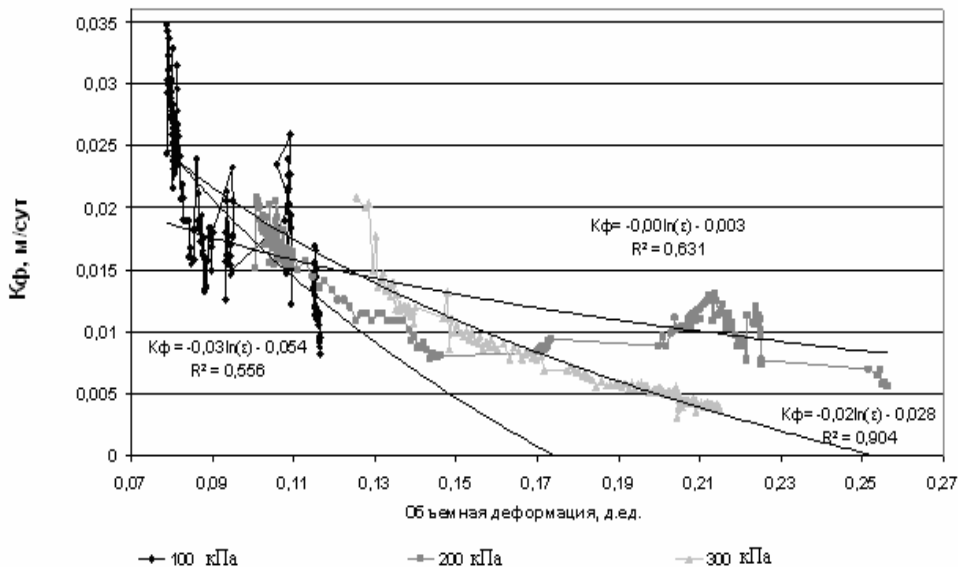


Рисунок 6 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород четвертичного возраста при направлении фильтрации параллельно напластованию: 100, 200, 300 кПа – диапазон нагружения

Из анализа результатов испытаний не отмечается влияния известной анизотропии структуры лессов природного сложения [6, 9]. Можно сделать вывод, что происходит смена природных доминирующих факторов на техногенные (геомеханическое и фильтрационное нагружение), которые определяют поведение лессовых массивов.

ВЫВОДЫ. Оценены изменения, происходящие в лессах при их насыщении и фильтрации грунтового потока, которые провоцируют процесс перехода структуры лесса в качественно новый с изменением характера структурных связей и новыми геомеханическими показателями. Для исследований использовалось оборудование трехосного сжатия TriSCAN (VJTech, Великобритания).

Серия испытаний фильтрационных параметров пород проведена в условиях трехосного сжатия при различных значениях нагрузок и направлениях фильтрации, геостатическое давление принималось в диапазоне 100–300 кПа, гидравлический градиент контролировался давлением в образце 20 кПа, что соответствовало реальным условиям грунтового массива.

Для фильтрации в вертикальном направлении прослеживается зависимость уменьшения проницаемости с увеличением геостатического давления при неизменном значении гидравлического градиента. Получена близкая к логарифмической зависимость между относительной объемной деформацией и проницаемостью во времени. Значения относительной объемной деформации подтверждают процессы разрушения и перестройки структуры лессовой породы при значительной статистической достоверности параметров ($R^2=0,63...0,91$). Гидрогеомеханика горизонтальной фильтрации показывает изменение коэффициента фильтрации лессовых пород во времени в диапазоне 0,0038...0,0209 м/сут при корреляции $R^2=0,75...0,96$.

По результатам экспериментов установлена инверсия фильтрационной анизотропии лессов в сравнении с ее природным положением, что следует отнести к техногенным изменениям грунтовых массивов. При радиальной нагрузке $\sigma_3 = 300$ кПа наблюдается суффозия, переходящая в эрозионный размыв с предварающей фазой формирования гидравличес-

ски инертных полостей. Описанные стадии качественно совпадают с визуальными наблюдениями формирования оползня течения на ж/м «Тополь» в г. Днепропетровске (1997 г.), что существенно обновляет методические подходы к прогнозированию подобных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовенко И.А., Деревягина Н.И. О потенциале активации оползневого лессового массива // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 2. – С. 80–84.
2. Садовенко И. А., Тимошук В.И., Тишков В. В., Куличенко И. И. Геотехнические и организационные подходы к выбору инженерной защиты оползневых склонов // Сборник научных трудов НГА Украины. – 1999. – № 6. – Т. 4. – С. 176–179.
3. Sadovenko, I.O., Rudakov D.V., and Timoschuk V.I. (2009) Analysis of dynamic impact on a ground slope during destruction of an emergency house. // Proc. NATO Adv. Res. Workshop. “Coupled site and soil-structure interaction effects with application to seismic risk mitigation”. Borovets, Bulgaria, 2008. Springer. PP. 305–312.
4. Кригер Н.И. Лесс. Формирование просадочных свойств. – М.: Наука, 1986. – 130 с.
5. Садовенко И.А., Куличенко И.И., Крысан В.И. и др. Исследование напряженно-деформируемого состояния нагруженного оползневого склона // Сбор. науч. трудов ПГАСА. – 1999. – Вып. 9, част. 1. – С. 75–79.
6. Горькова И.М., Окнина Н.А., Душкина Н.А., Рябичева К.Н. Природа прочности и деформационные особенности лессовых пород. – М.: Наука, 1964. – 148 с.
7. Садовенко И.А., Власов С.Ф., Максимова-Гуляева Н.А. Обоснование возможности использования струйной технологии закрепления грунтовых склонов на основе анализа противооползневых мероприятий // Науковий вісник НГАУ. – 2002. – № 5. – С. 31–33.
8. Ферсман А.Е. Избранные труды / Ферсман А.Е. – Том IV. – М.: Изд-во АН СССР. – 1958. – 588 с.
9. Бондарик Г.К., Горальчук М.И., Сироткин В.Г. Закономерности пространственной изменчивости лессовых пород. – М.: Недра, 1976. – 234 с.

EXPERIMENTAL STUDIES OF EROSION AND SUFFOSION STRAINS OF LOESS SOILS

I. Sadovenko, N. Dereyagina

State HEI “National Mining University”

prosp. K. Marksa, 19, Dnepropetrovsk, 49027, Ukraine. E-mail: natali.derev@gmail.com

Changes in loess soils when saturated and filtrated by groundwater flow are evaluated on the basis of experimental studies. A series of tests of filtration parameters were conducted in the condition of triaxial compression at different loads (geostatic pressure - in the range of 100–300 kPa, the hydraulic gradient is controlled by the pressure in a sample of 20 kPa) and filtering direction, corresponding to the real conditions of the soil mass. According to the results of experiments inversion of filter anisotropy of loess is established compared and with its natural position, that can be considered man-made changes in soil masses. Values of relative volume deformation confirm the processes of destruction and conversion of the loess soils. When a radial load of 300 kPa, it is observed the suffusion that is transformed into erosion with a precursor of the formation of a phase hydraulically inert cavities. The steps described are coincide qualitatively with the visual observations of the flow formed during the landslide on "Topol" in Dnipropetrovsk (1997), that significantly updates the methodological approaches to the prediction of such processes.

Key words: internal erosion, filtering, loess soils, erosion.

REFERENCES

1. Sadovenko, I.A., Derevyagina, N.I. (2012) "The potential activation of loess landslide array", *Naukoviy visnyk NGU*, vol. 2, pp. 80–84.
2. Sadovenko, I.A., Tymoshchuk, V.I., Tishkov, V.V., Kulichenko, I.I. (1999), "Geotechnical and organizational approaches to the selection of engineering protection of sliding slopes", *Sbornik nauchnih trudov NGA Ukraini*, vol. 6 (4), pp. 176–179.
3. Sadovenko, I.O., Rudakov, D.V., and Timoschuk, V.I. (2009) Analysis of dynamic impact on a ground slope during destruction of an emergency house. // *Proc. NATO Adv. Res. Workshop. "Coupled site and soil-structure interaction effects with application to seismic risk mitigation"*. Borovets, Bulgaria, 2008. Springer, pp. 305–312.
4. Krieger, N. (1986), *Less. Formirovanie prosadochnih svoystv* [Loess. Formation of subsidence properties], Nauka, Moscow, Russia.
5. Sadovenko, I.A., Kulichenko, I.I., Krysan, V.I., Tymoshchuk, V.I., Tishkov, V.V. (1999), "Investigation of the stress-strain state of the loaded landslide slope", *Sbornik nauchnih trudov PGASA*, vol. 9 (1), pp. 75–79.
6. Gorkova, I.M., Oknina, N.A., Dushkin, N.A., Ryabicheva, K.N. (1964), *Priroda prochnosti i deformacionnie osobennosti lessovih porod* [The nature of the strength and deformation characteristics of loess soils], Nauka, Moscow, Russia.
7. Sadovenko, I.A., Vlasov, S.F., Maksimova-Gulyaeva, N.A. (2002), "Rationale for the possibility of using inkjet technology consolidation of ground slope on the basis of the analysis of landslide events", *Naukoviy visnyk NGAU*, vol. 5, pp. 31–33.
8. Fersman, A.E. (1958), *Izbrannie trudi* [Selected works] Volume IV, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, Russia.
9. Bondarik, G.K., Goralchuk, M.I., Sirotkin, V. (1976) *Zakonomernosti prostranstvennoy izmenchivosti lessovih porod* [Patterns of spatial variability of loess], Nedra, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 08.05.2013.