

частотою, періодом коливань, амплітудою хвиль для опису і оцінки сейсмічного ефекту КУП зарядів ВР.

### Список використаних джерел

1. Динамическое поведение слоистой цилиндрической оболочки в грунтовом массиве при взрывном нагружении / В.В. Бойко, Н.С.Ремез, Т.В. Хлевнюк, Ю.В. Шевченко // Акустичний вісник. – 2003. – № 2. – С.10–16
2. Бойко, В.В. Управления амплитудо-частотным спектром короткозамедленного взрыва для снижения сейсмоефекта / В.В. Бойко, Д.А. Ремез // Вісник НТУУ «КПІ»: збірник наукових праць, 2011. – Вип. 20. С. 76-82. – (Серія «Гірництво»).
3. Бойко, В.В. Управление спектром колебаний на основе математического моделирования короткозамедленных взрывов / В. В. Бойко, Д. А. Ремез // Вісник Національного технічного університету України НТУУ «КПІ»: збірник наукових праць. – 2010. – № 19. – С. 28 – 34. – (Серія «Гірництво»).
4. Савмек, В.К. Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.К. Савмек, Б.Н. Кутузов. – М. Горная книга, 2012. – 228 с.
5. Кузьменко, А.О. Параметры пружных хвиль при выбухах розосереджених зарядів / А.О. Кузьменко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ»: збірник наукових праць. — 2000. – Вип. 3. – С. 45-51. – (Серія «Гірництво»).
6. Вовк, А.А. О временных параметрах сейсмозрывных волн./ А.А. Вовк, А.А. Кузьменко // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – Вип. № 2. – С. 25 – 32.

*Стаття надійшла до редакції 15.06.2015 р.*

УДК 628.4+ 504.062

**Н.С. Ремез**, д.т.н., проф., **Т.А. Осипова**, асп. (НТУУ «КПІ»)

### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ СЛОИСТОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

**N. S. Remez, T. A. Osipova** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

### STRESS STRAIN STATE OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS CONSIDERING LAYERED SOIL FOUNDATION

*Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния полигона твердых бытовых отходов для использования его в качестве основания сооружения. В работе впервые предлагается учитывать влияние подстилающего грунта на осадку тела полигона.*

**Ключевые слова:** осадка, твердые бытовые отходы, полигон ТБО, компрессия.

*Розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану полігону твердих побутових відходів для використання його в якості основи конструкції. У роботі вперше пропонується враховувати вплив підстиляючого ґрунту на осадку тіла полігону.*

**Ключові слова:** осадка, тверді побутові відходи, полігон ТПВ, компресія.

*The method of calculation of stress-strain state of the landfill for the use of landfill as a base of the structure was developed. For the first time it is proposed to consider the impact of the subsoil on the settlement of landfill.*

**Keywords:** settlement, municipal solid waste, landfill, compression.

**Введение.** В Украине под полигоны твердых бытовых отходов (ТБО) и свалки отведено свыше 160 тыс. га земель, 90 % отходов попадает на полигоны и не поддается переработке. В связи со стремительным увеличением объемов отходов и, как следствие, увеличением площадей, отводимых под полигоны, а также с интенсивным ростом городов и необходимостью отвода новых земель под строительство, остро встает вопрос об устойчивости полигонов и их возможном использовании в дальнейшем в качестве основания для инженерных сооружений и конструкций. Такая ситуация ставит перед учеными задачу по оценке и прогнозированию устойчивости свалки в качестве основы сооружений [1].

Анализ литературных источников показал, что экспериментальные методики оценки устойчивости свалки являются затратными и не всегда эффективны. Наиболее целесообразно для учета напружено-деформированного состояния слоев полигона и подстилающего грунтового массива и его характеристик применять математическое моделирование.

Математические модели, прогнозирующие осадку можно разделить на реологические модели, эмпирические модели, модели, базирующиеся на механике грунтов и модели, учитывающие биодegradацию [2-5].

Общей чертой математических моделей является то, что они учитывают только твердые бытовые отходы, их поведение и свойства, пренебрегая такой важной составляющей полигона, как грунты, лежащие в его основе. Именно от типа, прочности, геотехнических свойств подстилающего грунта зависит устойчивость полигона, поскольку наибольшую нагрузку испытывает именно он. В настоящее время этот вопрос не изучен.

Для прогнозирования оценки устойчивости полигона предлагается изучение его осадки с обязательным исследованием напряженно-деформированного состояния подстилающего грунтового основания, которое моделируется с учетом поэтапной нагрузки каждого слоя отходами. Это позволит оценить возможность использования полигона в качестве основы здания или конструкции с учетом типа грунта.

**Целью работы** является установление зависимости осадки закрытого полигона ТБО от свойств подстилающих слоистых грунтов для прогнозирования возможности использования его в качестве основания сооружения.

**Результаты исследования.** Для прогнозирования осадки закрытого полигона ТБО было проведено математическое моделирование. Покрывающий и подстилающий слои описывались моделью Кулона-Мора [6]. При этом тело полигона моделировалось слабым грунтом с учетом ползучести, использовалась модель Soft Soil Creep (SSC). В настоящее время данная модель наиболее полно описывает такие свойства слабого грунта, как зависящую от напряжения жесткость, а также вторичную компрессию с учетом ползучести.

Полная объемная деформация  $\varepsilon_v$ , вызванная ростом эффективных напряжений с начального значения  $p_0'$  до  $p'$  за период времени  $t_c+t'$ , выражается в виде суммы упругой составляющей  $\varepsilon_v^e$  и вязкопластической составляющей  $\varepsilon_v^{vp}$ . Вязкопластическая составляющая состоит из деформации во время консолидации  $\varepsilon_v^{vp}_c$  и после консолидации  $\varepsilon_v^{vp}_{ac}$ . Связь между деформациями выражается в следующем виде [7]:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^{vp}_c + \varepsilon_v^{vp}_{ac}. \quad (1)$$

Гидродинамические аспекты проблемы состоят в учете фильтрационных сил, действующих на скелет грунтовой среды, и параметров взаимодействия жидкой и твердой фаз грунта (давления, напряжения и пористости) в процессе консолидации. В предположении безвихревого течения фильтрационного потока и распределения сил сопротивления равномерно по сечению элемента используется обобщенный закон Дарси и уравнение неразрывности. Принимается, что сжимаемость скелета и поровой жидкости мала, что приводит к линейной зависимости пористости грунта от давления. Взаимодействие скелета грунта и жидкости характеризуется объемной силой, пропорциональной градиенту напора. Уравнения дополняются начальными и граничными условиями.

Для численного решения задачи использовался метод конечных элементов. Расчетная область покрывалась треугольными элементами.

Полигон, для которого было проведено моделирование, состоит из десяти слоев отходов, толщина каждого слоя 3 м. Осадка определялась с учетом пошагового нагружения полигона спустя 30 лет после его закрытия. В основании моделируемого полигона находятся глина и суглинков. Было проведено моделирование трех вариантов толщины глинистого слоя: 2 м, 10 м и 15 м. Толщина суглинкового слоя была постоянной – 10 м. Параметры подстилающих грунтов представлены в табл. 1.

Физико-механические параметры грунтов

| Параметр грунт   | Суглинок | Глина |
|--|----------|-------|
| Модуль деформации, $E_{ref}$                               | 10000    | 9000  |
| Коэффициент Пуассона, $\nu$                                | 0,34     | 0,34  |
| Удельный вес грунта, $\gamma_{unsat}$                      | 13       | 19,0  |
| Удельный вес водонасыщенного грунта, $\gamma_{sat}$        | 14,6     | 21,8  |
| Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении, $k_x$ | 0,006    | 0,004 |
| Коэффициент фильтрации в вертикальном направлении, $k_y$   | 0,006    | 0,004 |
| Сцепление, $c$   | 13       | 17    |
| Угол внутреннего трения, $\phi$                            | 14       | 13    |

Деформированная расчетная область полигона с толщиной глинистого слоя основания, равной 2 м, представлена на рис.1. Вертикальные деформации полигона представлены на рис.2. В результате численного расчета установлено, что максимальная вертикальная деформация составила 3,6 м.

Если толщина подстилающего глинистого слоя – 10 м (рис. 3), то можно наблюдать, что достигаются меньшие деформации (3,51 м). При увеличении толщины подстилающего глинистого слоя до 15 м, деформации, которые достигаются – наименьшие по сравнению с двумя предыдущими вариантами (3,48 м).

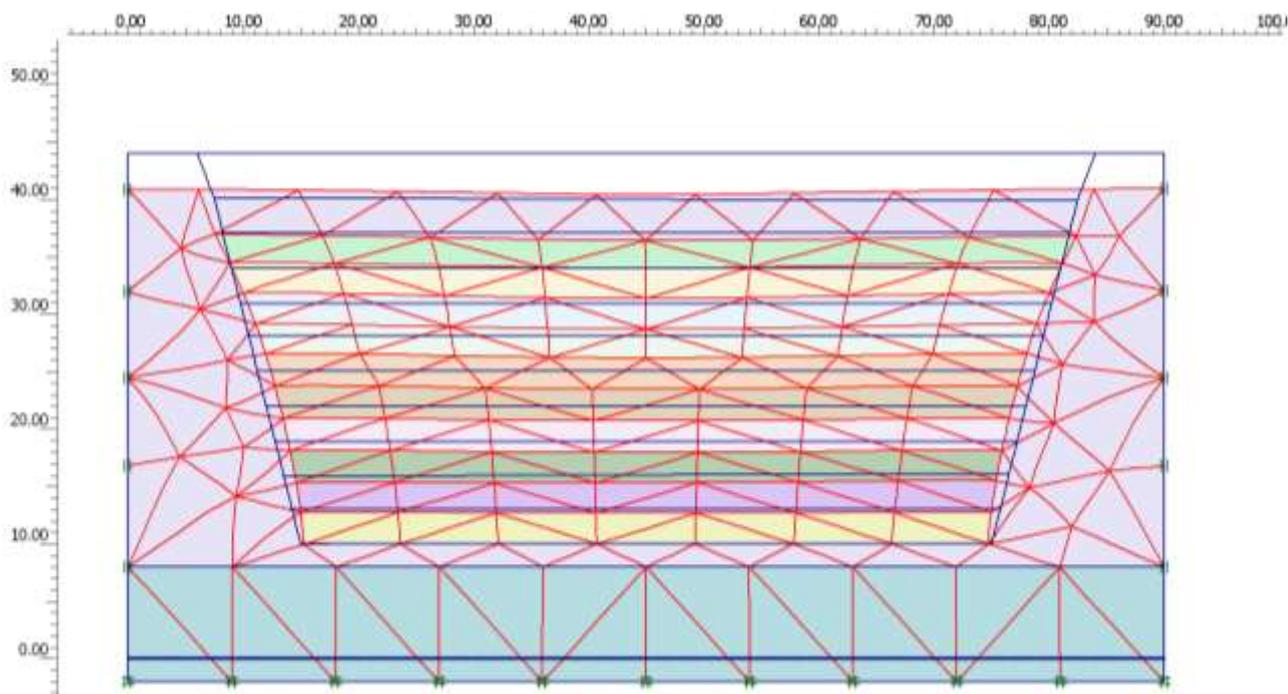


Рис.1. Деформированная расчетная область полигона с толщиной глинистого слоя основания 2 м

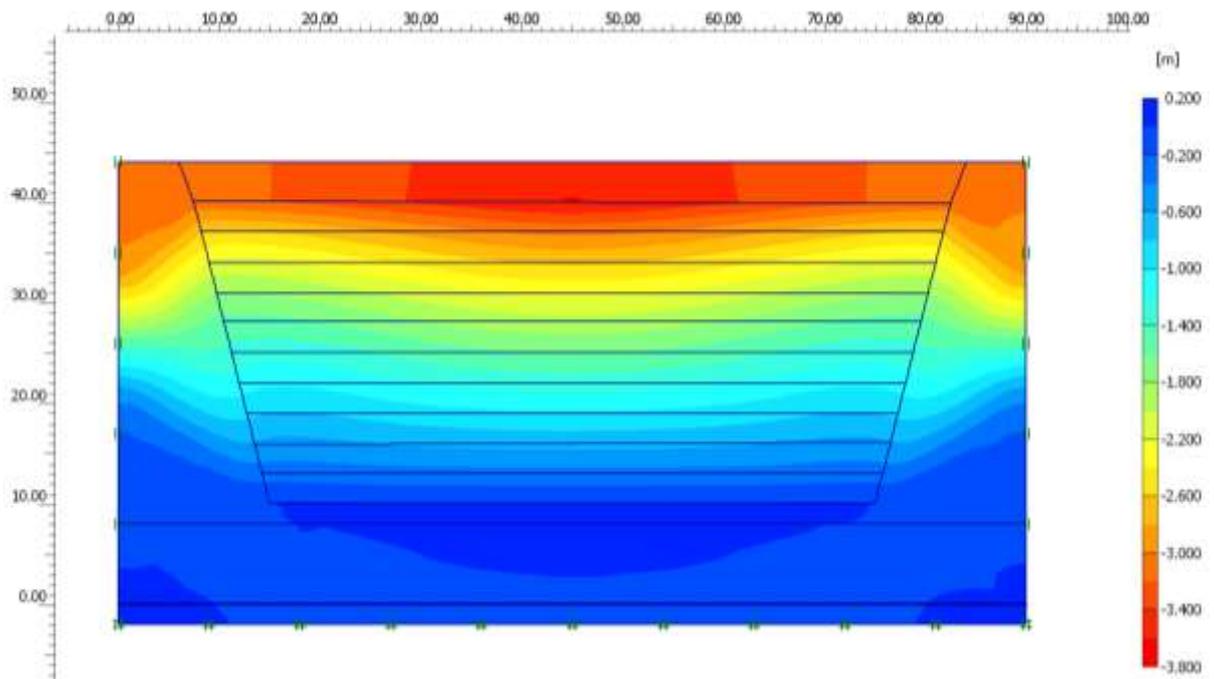


Рис. 2. Вертикальные деформации полигона с толщиной глинистого слоя основания 2 м

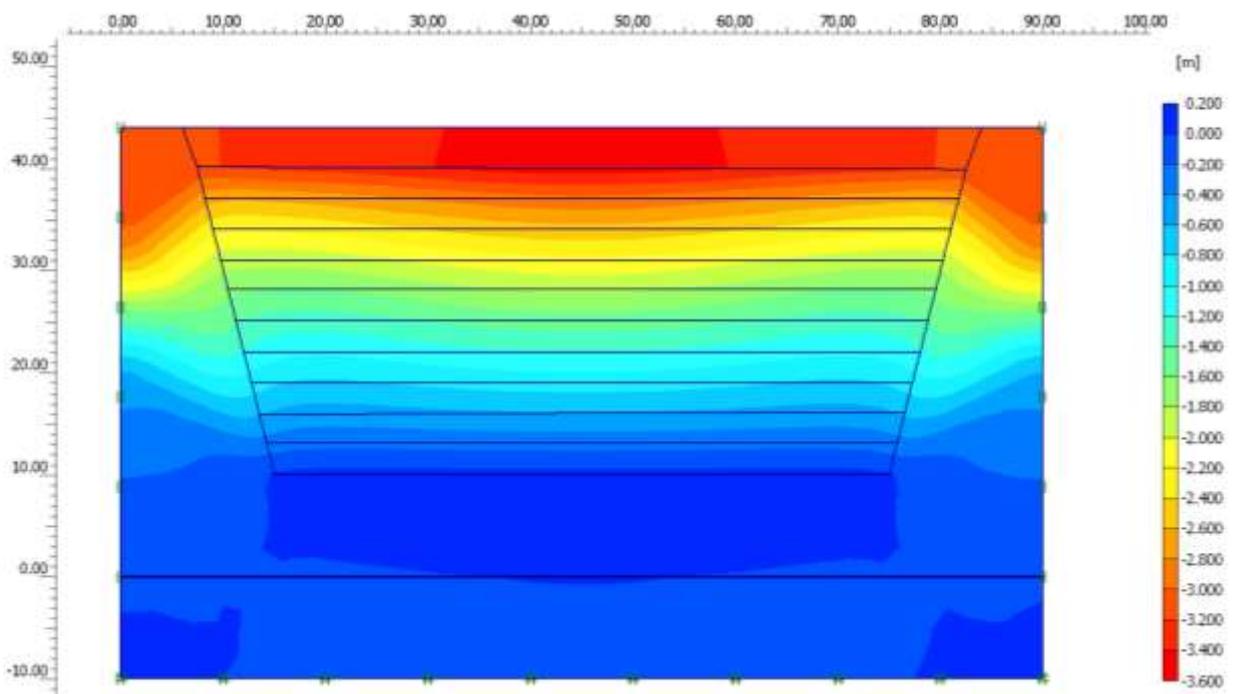


Рис. 3. Вертикальные деформации полигона с толщиной глинистого слоя основания 10 м

На рис.4 представлена расчетная область с выбранными точками, для которых построена зависимость осадки от времени размещения отходов на полигоне с толщиной глинистого слоя основания 15 м (рис. 5).

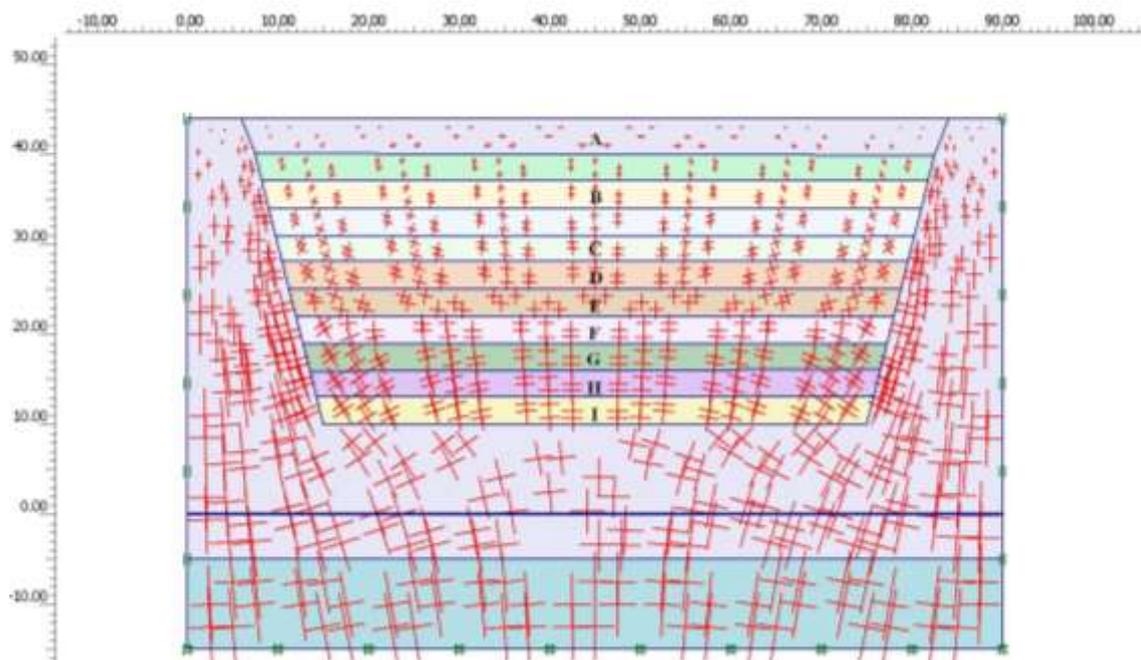


Рис. 4. Расчетная область с выбранными для расчета точками полигона с толщиной глинистого слоя основания 15 м

Из рис. 5 следует, что наибольшим вертикальным деформациям подвергаются верхние слои отходов, так как нижние слои наиболее уплотнены.

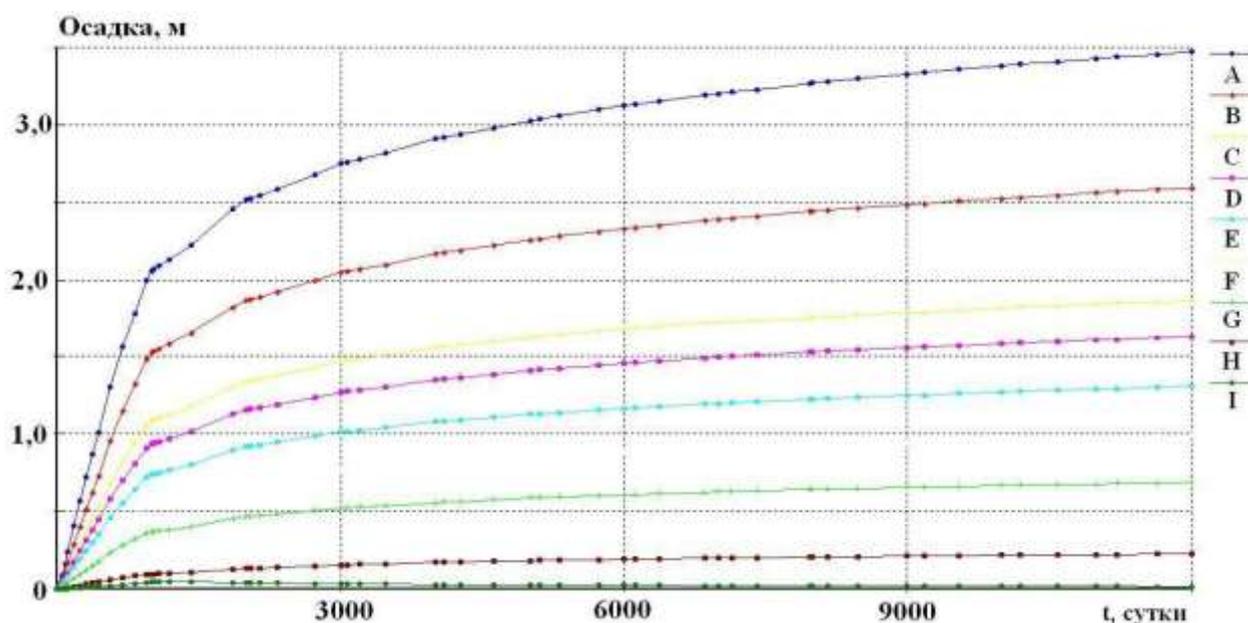


Рис. 5. Зависимость осадки от времени размещения отходов на полигоне с толщиной глинистого слоя основания 15 м

В результате проведенных исследований установлено, что при одинаковых характеристиках отходов и постоянной толщине суглинистого слоя увеличение толщины подстилающего глинистого слоя приводит к уменьшению осадки тела полигона. Так, при увеличении глинистого слоя с 2 м до 15 м произошло уменьшение осадки с 3,6 до 3,48 (на 3,3 %).

## Выводы

Разработана эффективная методика расчета осадки полигона ТБО, основанная на численном моделировании напряженно-деформированного состояния полигона и подстилающего грунта с использованием моделей SSC для полигона и Кулона-Мора для грунтового основания с применением метода конечны элементов.

Впервые предложено учитывать при расчете устойчивости полигона подстилающий грунт, так как он является одним из основных условий при формировании осадки.

Установлено, что увеличение подстилающего глинистого слоя приводит к значительному уменьшению осадки полигона, что согласуется с данными исследований осадки оснований и сооружений и свидетельствует о достоверности разработанной методики и возможности ее использования для прогнозирования осадки полигонов различных типов.

## Список использованных источников

1. Sivakumar Babu, G.L., Reddy, K.R., Chouskey, S.K., Kulkarni, H.S. Prediction of Long-term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model. Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management. New York, ASCE, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 139—150: [Electronic resource]. – Access mode: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.1944-8376.0000024](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000024).
2. Marques, A.C.M “Composite compressibility model for municipal solide waste” J.Geotech.Geoenviroen.eng. / A.C.M Marquesand , O.M. Vilar, 2003. – 129(4), 372-378.
3. Sowers, G. F. 1973. “Settlement of waste disposal fills.” Proc., 8th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering / G.F. Sowers. – Moscow, Russia, Vol. 2, 207–210.
4. Gibson, R. E. “A theory of soils exhibiting secondary compression.” Acta Polytech. Scand. / R. E. Gibson, K. Y. Lo, 1961. – C(10), 1–15.
5. Park, H. I. “Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition.” J. Resour. Manage. Technol / H. I. Park, S.R. Lee, 1997. – 24(4), 159–165.
6. Vermeer, P.A. A Soft Soil Model that Accounts for Creep. Proc. Int. Symp. “Beyond 2000 in Computational Geotechnics” / P.A. Vermeer, Neher H.P. 1999. – Amsterdam, pp. 249-261, Balkema, Rotterdam.
7. Rangeard, D. Influence of soil model on the analysis of pressuremeter test. In proceedings of Int. Conf. on Numer. Models in Geomech / D. Rangeard, R. Zentar, N-E. Abriak, 2004. – NUMOG IX, 699-705.

*Статья поступила в редакцию 09.09.2015 г.*