
ГЕОМЕХАНІКА

УДК 628.4+504.062

Н.С. Ремез, д.т.н., проф., **Т.А. Осипова**, асп. (НТУУ «КПІ»)**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ
НА ЕГО ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ С УЧЕТОМ
ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ**

N.S. Remez, T.A. Osipova (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)**THE INFLUENCE OF THE MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL
SHAPE ON ITS STRAIN STATE CONSIDERING SOIL FOUNDATION**

Проведено математичне моделювання напружено-деформованого стану полігону твердих побутових відходів для прогнозування його стійкості і можливого використання в якості основи споруди. Досліджувався вплив форми полігону і різних ґрунтів основи на осадку тіла полігону.

Ключові слова: *тверді побутові відходи; полігон ТПВ; деформація; математичне моделювання.*

Проведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния полигона твердых бытовых отходов для прогнозирования его устойчивости и возможного использования в качестве основания сооружения. Исследовалось влияние формы полигона и различных грунтов основания на осадку тела полигона.

Ключевые слова: *твердые бытовые отходы; полигон ТБО; деформация; математическое моделирование.*

The mathematical modeling of stress-strain state of landfill was conducted to predict its stability and the possibility of its using as a base of the structure. The effect of the landfill shape and the various subsoil on landfill settlement was researched.

Keywords: *municipal solid waste; landfill; strain; mathematical modeling.*

Введение. Проблемы состояния окружающей среды в Украине и мире приобретают все большую актуальность в связи с повышением уровня антропогенного воздействия на объекты природы. Серьезной проблемой мирового масштаба выступает увеличение объемов накопления отходов. В Украине уже около 7% территории находится под твердыми бытовыми отходами, объем которых ежегодно растет. Так, в Украине ежегодно образуется 52 млн. тонн бытового мусора, объем которого растет ежегодно на 1,5-2,5 %. Лишь 5 % отходов перерабатывают, остальные 95 % вывозят на свалки и полигоны. По данным официальной статистики, в Украине действует около 6 тыс. свалок и полигонов мусора общей площадью 7,4 тыс. гектаров, 32 тыс. несанкционированных свалок, 15 сортировочных линий и только два

мусоросжигательных завода. Часто свалки и полигоны, очень перегружены (около 5%) или не соответствуют установленным нормам экологической безопасности (около 16%) [1].

В связи с этим, остро встает вопрос об устойчивости полигонов и их возможном использовании в дальнейшем в качестве оснований для инженерных сооружений и конструкций. Такая ситуация ставит перед учеными задачу по оценке и прогнозированию устойчивости свалки в качестве основы сооружений.

Для прогнозирования устойчивости полигона предлагается изучение его осадки с обязательным учетом формы полигона, а также 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 твердых бытовых отходов (ТБО) от свойств подстилающих слоистых грунтов, а также от формы полигона 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 [2]. 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. Следует отметить, что модель Soft Soil Creep (SSC) учитывает как физическую, так и геометрическую нелинейность процесса деформирования грунта.

Полная объемная деформация ε_v , вызванная ростом эффективных напряжений с начального значения p_0' до p' за период времени t_c+t' , выражается в виде суммы упругой составляющей ε_v^e и вязкопластической составляющей ε_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 [3]:

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

Упругая составляющая деформации, вязкопластическая составляющая деформации во время консолидации и вязкопластическая составляющая деформации после завершения консолидации определяются по формулам

$$\varepsilon_v^e = \kappa^* \ln \frac{p'}{p_0'} ; \quad (2)$$

$$\varepsilon_v^{vp} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \frac{p'_{pc}}{p'_0}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_v^{vp} = \mu^* \ln \frac{\tau_c + t'}{\tau_c}, \quad (4)$$

где κ^* - модифицированный коэффициент набухания; λ^* - модифицированный коэффициент компрессии (сжатия); μ^* - модифицированный коэффициент ползучести; t_c - время окончания первичной консолидации; t - время, прошедшее с начала загрузки полигона; τ_c - время консолидации; p'_0 - начальное эффективное напряжение; p' - эффективное напряжение; p'_{pc} - эффективное преконсолидационное напряжение

Отношение параметров модели к международно-нормированным параметрам следующее:

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2,3(1 + e_0)}; \lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1 + e_0)}; \kappa^* = \frac{2C_s}{2,3(1 + e_0)}, \quad (5)$$

где C_c - коэффициент компрессии; C_s - коэффициент набухания; C_α - коэффициент ползучести.

Подстилающий грунт моделировался с помощью модели Кулона-Мора, которая представлена в виде шести поверхностей текучести и шести пластическими потенциальными функциями.

Полное условие текучести Кулона-Мора состоит из шести функций (поверхностей текучести f), которые формулируются следующим образом:

$$\begin{aligned} f_{1a} &= \frac{1}{2} \sigma'_2 - \sigma'_3 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_3 \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{1b} &= \frac{1}{2} \sigma'_3 - \sigma'_2 + \frac{1}{2} \sigma'_3 + \sigma'_2 \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{2a} &= \frac{1}{2} \sigma'_3 - \sigma'_1 + \frac{1}{2} \sigma'_3 + \sigma'_1 \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{2b} &= \frac{1}{2} \sigma'_1 - \sigma'_3 + \frac{1}{2} \sigma'_1 + \sigma'_3 \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{3a} &= \frac{1}{2} \sigma'_1 - \sigma'_2 + \frac{1}{2} \sigma'_1 + \sigma'_2 \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{3b} &= \frac{1}{2} \sigma'_2 - \sigma'_1 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_1 \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где c - сцепление; $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ - нормальные напряжения; φ - угол внутреннего трения; ψ - угол дилатансии.

В дополнение к поверхностям текучести, модель Кулона-Мора представлена шестью пластическими потенциальными функциями g :

$$\begin{aligned}
 g_{1a} &= \frac{1}{2} \sigma'_2 - \sigma'_3 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_3 \sin \psi; \\
 g_{1b} &= \frac{1}{2} \sigma'_3 - \sigma'_2 + \frac{1}{2} \sigma'_3 + \sigma'_2 \sin \psi; \\
 g_{2a} &= \frac{1}{2} \sigma'_3 - \sigma'_1 + \frac{1}{2} \sigma'_3 + \sigma'_1 \sin \psi; \\
 g_{2b} &= \frac{1}{2} \sigma'_1 - \sigma'_3 + \frac{1}{2} \sigma'_1 + \sigma'_3 \sin \psi; \\
 g_{3a} &= \frac{1}{2} \sigma'_1 - \sigma'_2 + \frac{1}{2} \sigma'_1 + \sigma'_2 \sin \psi; \\
 g &= \frac{1}{2} \sigma'_2 - \sigma'_1 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_1 \sin \psi.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

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 [4].

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, песок и суглинок. Было проведено моделирование для двух вариантов форм полигона: трапеция и прямоугольная трапеция. Параметры подстилающих грунтов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические параметры грунтов

Параметр	Грунт		
	Песок	Суглинок	Глина
Модуль деформации E_{ref} , ($\kappa\text{H}/\text{M}^2$)	18000	10000	9000
Коэффициент Пуассона ν , (ед.)	0,34	0,36	0,37
Удельный вес грунта γ_{unsat} , ($\kappa\text{H}/\text{M}^3$)	18,0	13	19,0
Удельный вес водонасыщенного грунта γ_{sat} , ($\kappa\text{H}/\text{M}^3$)	20,7	14,6	21,8
Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении k_x , (ед.)	0,5	0,006	0,004
Коэффициент фильтрации в вертикальном направлении k_y , (ед.)	0,5	0,006	0,004
Модуль деформации E , (МПа)	50	33	28
Удельное сцепление c , (кПа)	3	34	81
Угол внутреннего трения φ , (град)	31	14	13

Деформированная расчетная область полигона с глинистым основанием и с углом наклона тела полигона, равном 30° , представлена на рис. 1. Из анализа численных расчетов следует, что вертикальные деформации полигона составили 4,2 м.

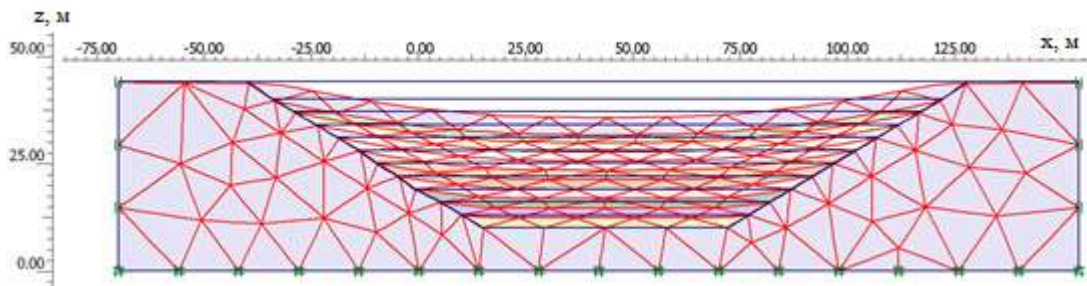


Рис.1. Деформированная расчетная область полигона с глинистым основанием

В результате численного расчета установлено, что при таком же угле наклона, максимальная вертикальная деформация составила: для полигона с песком – 4,29 м (рис. 2), с суглинком – 4,26 м.

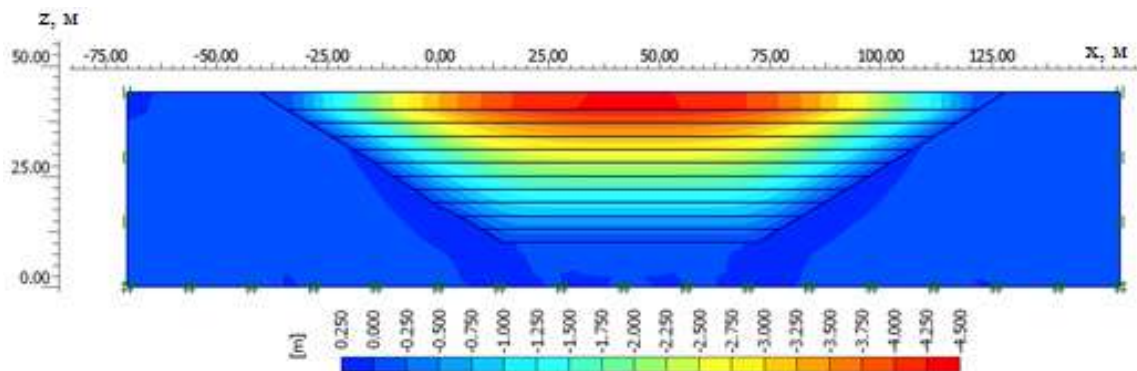


Рис. 2. Вертикальные деформации полигона с песчаным основанием

Для установления влияния формы полигона на его осадку, было проведено моделирование для полигона в форме прямоугольной трапеции при сохранении того же объема отходов, как и в предыдущем случае. При этом рассматривались три типа грунтов основания: песок, глина и суглинок. В результате проведенных исследований установлено, что кроме вертикальных деформаций, появились также существенные горизонтальные деформации. Наблюдается существенное влияние подстилающего грунта на величину деформаций. Так, если подстилающий слой – песок (рис. 3), то можно наблюдать, что достигаются вертикальные деформации (5,78 м), при суглинке – 5,74 м. При глинистом подстилающем слое (рис. 4) вертикальные деформации – наименьшие по сравнению с двумя предыдущими вариантами (5,62 м). Обратная картина наблюдается для горизонтальных деформаций: наименьшая для песка – 2,8 м; наибольшая для глины – 3,22 м. Это связано с тем, что грунты основания являются более плотными средами, чем тело полигона. Чем

более плотный грунт, тем он оказывает большее противодействие, действуя как твердая стенка.

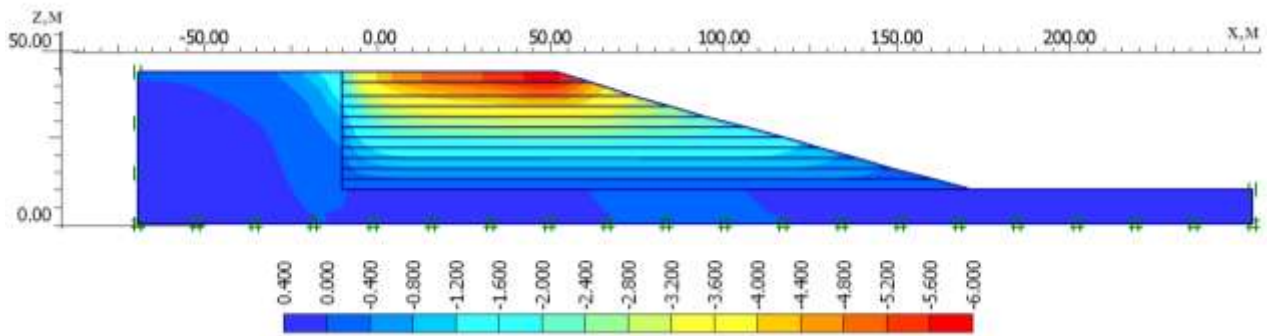


Рис. 3. Вертикальные деформации полигона с песчаным основанием

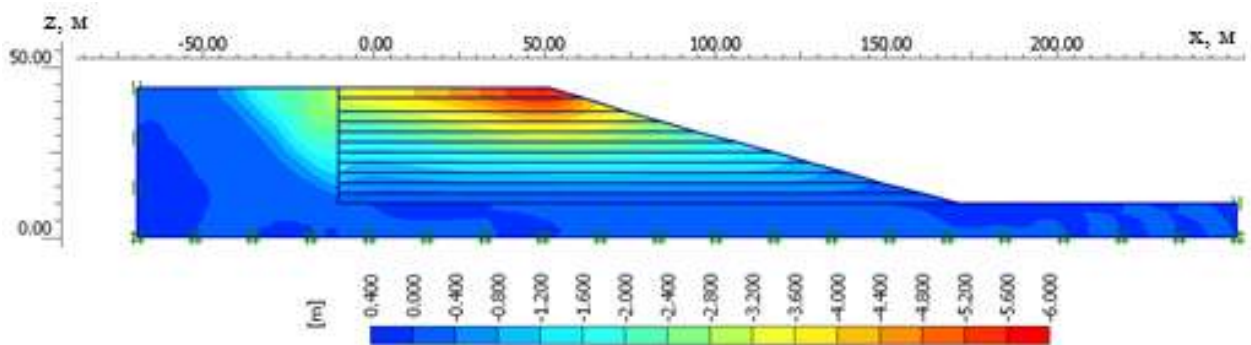


Рис. 4. Вертикальные деформации полигона с глинистым основанием

Выводы

Исследовано влияние формы полигона на изменение его деформаций на основании разработанной методики расчета осадки полигона ТБО, основанной на численном моделировании напряженно-деформированного состояния полигона и подстилающего грунта. Для тела полигона использовалась модель SSC, для грунтового основания – модель Кулона-Мора. Применялся метод конечных элементов.

В результате проведенных исследований установлено, что при одинаковых параметрах тела полигона, постоянной толщине подстилающего слоя полигон в форме прямоугольной трапеции менее устойчив, чем в форме равнобедренной трапеции. Так, для глинистого основания осадка увеличилась с 4,2 м до 5,62 м (на 33,8 %), для песчаного основания и для суглинка в основании – на 34,7 %. При этом появляются горизонтальные деформации, связанные с наличием наклонной свободной поверхности, величина которых находится в обратной зависимости от подстилающего грунта: наибольшая для глинистого основания, а наименьшая для песчаного.

Список использованных источников

1. Тихенко, В. С. Реалізація національних та наднаціональних проектів збирання та переробки побутових відходів в Україні [Текст] / В. С. Тихенко // Вісник Дніпропетровського університету: науковий журнал, серія: Економіка – Дніпропетровськ, 2014.- Т. 22. № 10/1. Вип. 8 (2). – с.84-88.

2. Vermeer P.A., Neher H.P. (1999): A Soft Soil Model that Accounts for Creep. Proc. Int. Symp. "Beyond 2000 in Computational Geotechnics", Amsterdam, pp. 249-261, Balkema, Rotterdam.

3. Rangeard, D., Zentar, R. & Abriak, N-E. (2004) Influence of soil model on the analysis of pressuremeter test. In proceedings of Int. Conf. on Numer. Models in Geomech., NUMOG IX, 699-705

4. Ремез, Н.С. Напряженно-деформированное состояние полигонов твердых бытовых отходов с учетом слоистого грунтового основания [Текст] / Н.С. Ремез, Т.А. Осипова // «Вісник НТУУ «КПІ»: зб. наук. праць. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – Вип. 28. – С. 11 – 17. – (Серія «Гірництво»).

Статья поступила в редакцию 14.03.2016 г.

УДК 624.159.1

А.М. Самедов, д. т. н., проф., **В.Г. Кравець**, д. т. н., проф., **Д.В. Ткач** асп. (НТУУ «КПІ»)

ОТЖАТИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ, УПЛОТНЕНИЕ, КОНСОЛИДАЦИЯ И ПОЛЗУЧЕСТЬ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ ПРИ СЖАТИИ

A. Samedov, V. Kravets, D. Tkach (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

WRUNG PORE WATER, SEALS, CONSOLIDATION AND CREEP IN SATURATED SOIL UNDER COMPRESSION

Рассмотрены проблемы отжатия поровой воды, уплотнение, фильтрационная консолидация и ползучесть водонасыщенных грунтов при сжатии. В компрессионных испытаниях образцов из водонасыщенных глинистых грунтов после отжатия поровой воды получены коэффициенты относительной сжимаемости условно-мгновенного времени, после уплотнения и фильтрационной консолидации, и стабилизации деформаций. Определены прочностные и деформационные показатели после отжатия поровой воды и уплотнения. Предложены уравнения последовательной ползучести и определены входящие параметры на основе коэффициентов относительной сжимаемости после стабилизации деформаций, фильтрационной консолидации.

Ключевые слова: отжатие; поровая вода; нейтральные давления; эффективные давления; уплотнение; консолидация; наследственная ползучесть; скелет грунта;