

УДК 624.131

Офрихтер В.Г. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: ofrikhter@mail.ru

Лихачева Н.Н. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: olga@pstu.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Адрес организации: 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

Реологическая модель твердых бытовых отходов

Аннотация

Твердые бытовые отходы (далее ТБО) представляют собой армогрунтоподобный материал, к которому можно применять закономерности механики грунтов.

При изучении армогрунтов и армогрунтоподобных материалов важно исследовать зависящие от времени явления, такие как ползучесть или релаксация напряжений. При общем описании армогрунтоподобного материала должны приниматься в расчет реологические свойства армирующей матрицы. Ползучесть армирования оказывает заметное влияние на общее поведение армогрунтоподобного массива.

Реологическая модель ТБО позволяет прогнозировать развитие напряженно-деформированного состояния массива отходов во времени и затухание осадков. Надежность прогноза зависит от достоверности показателей физико-механических свойств и реологических характеристик механической ползучести и биологического разложения отходов, определяемых в ходе полевых и лабораторных испытаний.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, армогрунтовый материал, реологическая модель.

1. Введение

Твердые бытовые отходы (далее ТБО) представляют собой армогрунтоподобный материал, к которому можно применять закономерности механики грунтов. Особенности классификации ТБО приведены в статье [1].

При изучении армогрунтов и армогрунтоподобных материалов важно исследовать зависящие от времени явления, такие как ползучесть или релаксация напряжений. При общем описании армогрунтоподобного материала должны приниматься в расчет реологические свойства армирующей матрицы. Ползучесть армирования оказывает заметное влияние на общее поведение армогрунтоподобного массива, что подтверждается доступными эмпирическими результатами, зафиксировавшими значительные деформации и последующие изменения геометрии конструкций [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13].

Как было отмечено [10], графики осадков ТБО характеризуются двумя практически линейными функциями с разными угловыми коэффициентами (рис. 1).

Скорость осадки по отношению к логарифму времени изменяется в интервале между 200 и 650 днями с момента окончания заполнения полигона от относительно малой вначале до относительно более значительной впоследствии. Вплоть до окончания периода наблюдений (минимум 10000 дней) нет никакого намека на дальнейшее изменение скорости осадки. Изменение скорости осадки по отношению к логарифму времени могут быть признаками биодеградации и процессов физико-химического разложения ТБО [12].

2. Типы поведения армогрунтоподобного материала ТБО

Рассмотрим два типа поведения простой модели упруго-пластической грунтоподобной основной породы ТБО, армированной вязко-упругой армирующей матрицей (аналог [14]). Первый тип поведения соответствует упругой грунтоподобной породе (E-V тип) и второй – пластической породе (P-V тип). Для описания упругого диапазона поведения грунтоподобной породы принимается закон Гука, а для описания пластических свойств породы – условие текучести Кулона-Мора с ассоциированным законом течения. Работа армирующей матрицы предполагается только в одном направлении (оси X). Проскальзывание по отношению к грунту в расчет не принимается (совершенное сцепление). Упругая модель твердых бытовых отходов описана в статье [3], упругопластическая – в статье [4].

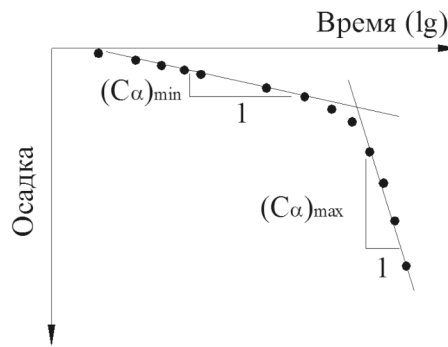


Рис. 1. Идеализированный график осадки полигона ТБО в зависимости от логарифма времени [2]

Рассмотрим стандартную вязко-упругую модель армирующей матрицы (рис. 2). Модель состоит из двух основных элементов, соединенных вместе в последовательности $H_1 - (H_2 | N) = H_1 - K$, а именно пружины (упругий элемент Гука – H_1), определяемой ее жесткостью E_1 и системы Кельвина (упруго-вязкое тело Кельвина-Фойгта – K), характеризующейся жесткостью E_2 (упругий элемент Гука – H_2) и вязкостью η (вязкий элемент Ньютона – N).

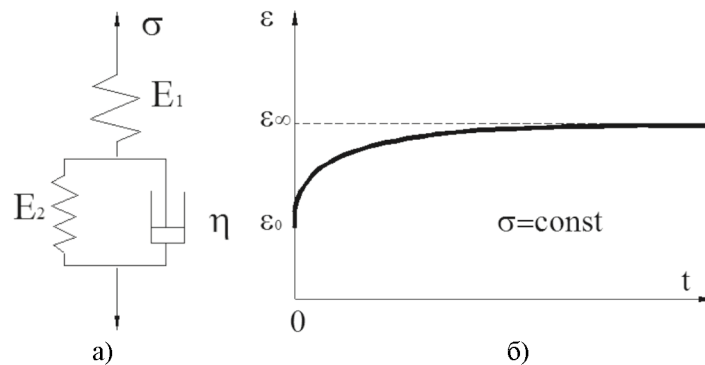


Рис. 2. Стандартная реологическая модель (а) и типичная кривая ползучести (б) [16]

В одномерном случае модель может быть описана следующим базовым уравнением [16]:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1 + E_2}{\eta} \sigma = E_1 \left[\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta} \varepsilon \right]. \tag{1}$$

В уравнение (1) подставим микронапряжения и микродеформации:

$$\frac{d\sigma_x^r}{dt} + \frac{E_1 + E_2}{\eta} \sigma_x^r = E_1 \left[\frac{d\varepsilon_x^r}{dt} + \frac{E_2}{\eta} \varepsilon_x^r \right], \tag{2}$$

где индекс r означает армирующую составляющую, а индекс s – грунтоподобную.

Методы, представленные в настоящей статье могут быть применены для других реологических моделей.

В рассматриваемом случае ограничения, налагаемые деформацией компонентов и совместностью микронапряжений, принимают следующий вид (направление армирования совпадает с осью X):

$$\sigma_y = \sigma_y^s = \sigma, \tag{3}$$

$$\sigma_x = n_s \sigma_x^s + n_r \sigma_x^r, \tag{4}$$

$$\tau_{xy} \cong \tau_{xy}^s = \tau, \tag{5}$$

$$\varepsilon_y \cong \varepsilon_y^s, \tag{6}$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^s = \varepsilon_x^r, \tag{7}$$

$$\gamma_{xy} \cong \gamma_{xy}^s. \tag{8}$$

На рис. 3. изображены две фазы (типа) поведения ТБО. Предполагается, что начальные напряженные состояния, как макро-, так и микро- известны. Рассматривается случай постоянных макронапряжений, когда изменение микронапряжений возможно вследствие ползучести армирующей матрицы.

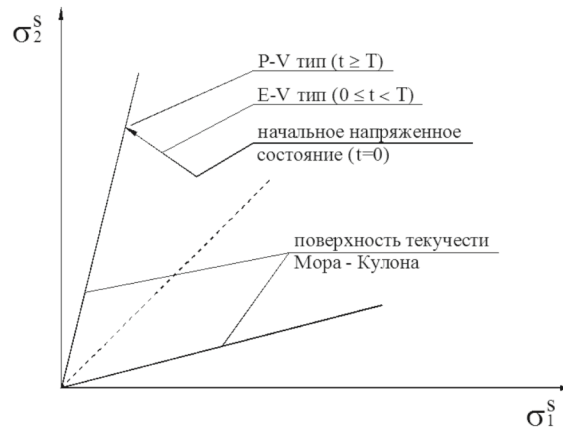


Рис. 3. Иллюстрация двух типов поведения ТБО в пространстве главных микронапряжений [16]

В первой фазе (*E-V* тип) основная порода остается в упругом состоянии, а армирующая матрица – в вязкоупругом. Эта фаза заканчивается при достижении основной породой условия текучести. Это соответствует началу второй фазы поведения композита (*P-V* тип), в которой основная порода ТБО работает в пластической зоне с вязкоупругой армирующей матрицей.

Условие текучести ТБО описано в статье [2]

3. Упругая основная порода – вязкоупругая армирующая матрица

Упругие микродеформации грунтоподобной основной породы, работающей в плоском напряженном состоянии даны в выражениях (9) и (10):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_s} \left[(1 - \nu^2 B_x^s) \sigma_x - B_x^s (\nu + \nu^2 - 2C) \sigma_y \right] = B_1^x \sigma_x + B_2^x \sigma_y, \tag{9}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E_s} \left[-\nu(1 + \nu) \sigma_x + (1 - \nu^2) \sigma_y \right] = B_1^y \sigma_x + B_2^y \sigma_y, \tag{10}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} = B^{xy} \tau_{xy}, \tag{11}$$

$$B_x^s = \frac{E_s}{n_s E_s + n_r E_r}; C = \frac{n_s E_r}{\nu_s n_r E_s}; B_1 = \frac{1 - \nu^2}{E_s}; B_2 = \frac{\nu}{E_s}; B_3 = \frac{\nu + \nu^2 - 2C}{E_s};$$

$$B_1^x = \frac{1 - \nu^2 B_x^s}{E_s}; B_2^x = -B_3 B_x^s; B_1^y = -B_2(1 + \nu); B_2^y = B_1; B^{xy} = \frac{1}{G}. \tag{12}$$

Вязко-упругое поведение армирующей матрицы определяется выражением (2).

В случае постоянных макронапряжений, подстановка выражения (9) с учетом (7) в уравнение (2) приводит, после несложных математических преобразований, к

дифференциальному уравнению для напряжений в вязкоупругой армирующей матрице в каноническом виде:

$$\frac{d\sigma_x^r}{dt} + D\sigma_x^r = F, \quad (13)$$

$$\text{где } D = \frac{E_1 E_s - E_2 (2E_1 B_x^s - E_s)}{E_s \eta}; F = \frac{E_1 E_2}{\eta E_s} \left[(1 - \nu^2 B_x^s) \sigma_x - \nu (1 + \nu) B_x^s \sigma_y \right].$$

Начальные условия имеют следующий вид:

$$\sigma_x^r(t=0) = \sigma_0^r \quad (14)$$

где σ_0^r – начальные напряжения в армирующей матрице.

Решение уравнения (13) с начальными условиями (14) имеет вид [16]:

$$\sigma_x^r = \left(\sigma_0^r - \frac{F}{D} \right) e^{-Dt} + \frac{F}{D}. \quad (15)$$

Уравнение (15) описывает уменьшение растягивающих усилий в армирующей матрице и имеет силу для временного интервала $0 \leq t < T$, где T обозначает время, соответствующее началу пластического течения грунта. Соответствующие изменения в горизонтальных напряжениях в основной породе описываются выражением (16), которое означает, что сжимающие напряжения в основной породе также уменьшаются в течение рассматриваемого процесса:

$$\sigma_x^s = \frac{\sigma_x - n_r \sigma_x^r}{n_s}. \quad (16)$$

Подстановка уравнения (15) в уравнение (9) дает макроскопическое основное уравнение (17), описывающее горизонтальные деформации в основной породе ТБО, в которых принято в расчет влияние ползучести армирующей матрицы:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_s} \left\{ (1 - \nu^2 B_x^s) \sigma_x + 2B_x^s \left[\left(\sigma_0^r - \frac{F}{D} \right) e^{-Dt} + \frac{F}{D} \right] - \nu (1 + \nu) B_x^s \sigma_y \right\}. \quad (17)$$

Уравнения (10) и (17) имеют силу до достижения основной породой ТБО условия текучести.

Примем специфическую форму условия текучести Кулона-Мора, которое имеет следующий вид в принятой системе обозначений:

$$f^s = (\sigma_y - \sigma_x^s) - (\sigma_y + \sigma_x^s) \sin \phi \leq 0. \quad (18)$$

Вышеприведенное неравенство определяет область изменения σ_x^s , соответствующую упругому поведению основной породы:

$$\sigma_x^s \geq \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \sigma_y = \Theta. \quad (19)$$

Основная порода становится пластичной, когда $\sigma_x^s = \Theta$. Подстановка уравнений (15) и (16) в условие (19) приводит к выражению:

$$\sigma_x^s = \frac{\sigma_x - n_r \sigma_x^r}{n_s} = \frac{\sigma_x}{n_s} - \frac{n_r \left[\left(\sigma_0^r - \frac{F}{D} \right) e^{-Dt} + \frac{F}{D} \right]}{n_s} = \Theta. \quad (20)$$

Время T , соответствующее началу пластического течения в основной породе ТБО определяется выражением:

$$T = -\frac{1}{D} \ln Q, \quad (21)$$

$$\text{где } Q = \frac{D\sigma_x - Dn_s\Theta - n_r F}{n_r (D\sigma_0^r - F)}.$$

Необходимо отметить, что для достижения физически разумного решения должно выполняться условие $0 < Q < 1$.

4. Пластичная основная порода – вязкоупругая армирующая матрица

После достижения основной грунтоподобной породой условия текучести, начинается вторая фаза поведения ТБО (P - V тип).

Условие текучести основной породы в составляющих напряжениях определяется выражением [5]:

$$f = (\sigma_y - \sigma_x^s)^2 - (\sigma_y + \sigma_x^s)^2 \sin^2 \phi + 4\tau_{xy}^2 = 0. \quad (22)$$

Скорости пластических деформаций можно определить с помощью ассоциированного закона течения [16]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (23)$$

где f – функция текучести:

$$d\varepsilon_x^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_x^s} = -2d\lambda [\sigma_y (1 + \sin^2 \phi) - \sigma_x^s \cos^2 \phi], \quad (24)$$

$$d\varepsilon_y^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} = 2d\lambda [\sigma_y \cos^2 \phi - \sigma_x^s (1 + \sin^2 \phi)], \quad (25)$$

$$d\varepsilon_{xy}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}} = 2d\lambda (4\tau_{xy}). \quad (26)$$

Для упрощения пренебрежем упругими деформациями основной породы.

Процесс приложения нагрузки (в дальнейшем – нагружения) может быть представлен соответствующей траекторией в пространстве напряжений, а действительное (фактическое) напряженное состояние – вектором σ в том же пространстве (рис. 4).

Напряженное состояние, представленное вектором σ , лежащим внутри поверхности текучести, вызывает только упругие деформации. Когда конец вектора напряжений лежит на поверхности текучести, возможно также развитие пластических деформаций. Последующее приращение напряжений может быть направлено или внутрь поверхности текучести (разгрузка) или по касательной к этой поверхности (нейтральное нагружение). Во втором случае:

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\sigma = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = 0. \quad (27)$$

Необходимо отметить, что используются разные системы обозначений – или индексная или абсолютная.

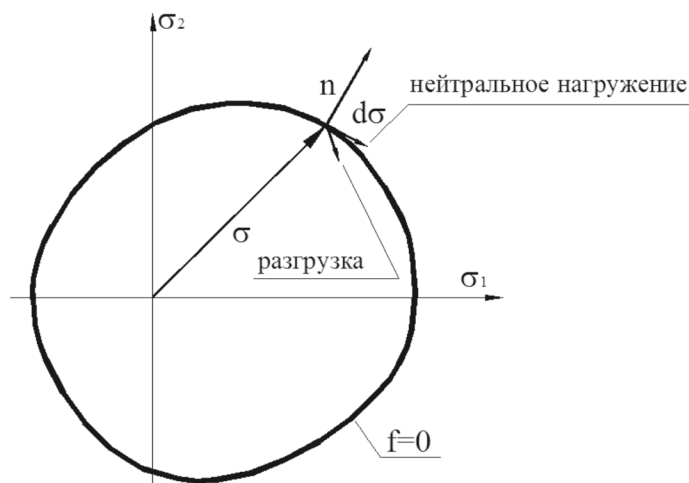


Рис. 4 [16] Иллюстрация разгрузки и нейтрального нагружения

Разгрузка описывается законом Гука. При нейтральном нагружении развиваются как упругие, так и пластические деформации. Пластические деформации, которые могут развиваться при удовлетворении условий текучести определяются законом течения. Поскольку величина пластического течения не ограничена, нельзя ничего сказать об общих пластических деформациях, но можно представить так называемую скорость деформаций. Общая скорость деформаций состоит из упругой и пластической частей (28) [16]:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial \xi} = \frac{\partial \varepsilon_{ij}^e}{\partial \xi} + \frac{\partial \varepsilon_{ij}^p}{\partial \xi}, \quad (28)$$

где ξ – монотонно возрастающий параметр.

Значение ξ не всегда физически ясно. Во многих публикациях этот параметр рассматривается как время. Необходимо отметить, что идеально пластичное поведение не должно зависеть от реального времени, таким образом, более удобно ввести приращение пластических деформаций $d\varepsilon_{ij}^p$ взамен скорости деформаций [16].

Условия нагружения (27) для рассматриваемого случая получаются путем дифференцирования выражения (22):

$$\begin{aligned} \partial f / \partial \sigma_x^s &= -2 \left[\sigma_y \left(1 + \sin^2 \phi \right) - \sigma_x^s \cos^2 \phi \right]; \\ \partial f / \partial \sigma_y &= 2 \left[\sigma_y \cos^2 \phi - \sigma_x^s \left(1 + \sin^2 \phi \right) \right]; \quad \partial f / \partial \tau_{xy} = 8 \tau_{xy}. \end{aligned}$$

Условия нагружения имеют вид:

$$df = - \left[\sigma_y \left(1 + \sin^2 \phi \right) - \sigma_x^s \cos^2 \phi \right] d\sigma_x^s + \left[\sigma_y \cos^2 \phi - \sigma_x^s \left(1 + \sin^2 \phi \right) \right] d\sigma_y + 8 \tau_{xy} d\tau_{xy} = 0 \quad (29)$$

В случае постоянных макронапряжений $d\sigma_y = d\sigma_x = d\tau_{xy} = 0$ из уравнения (29) имеем:

$$\left[\sigma_y \left(1 + \sin^2 \phi \right) - \sigma_x^s \cos^2 \phi \right] d\sigma_x^s = 0. \quad (30)$$

Уравнение (30) обращается в равенство, когда либо $d\sigma_x^s = 0$, либо выражение в квадратных скобках равно нулю, что приводит к условию:

$$d\sigma_x^s = 0 \rightarrow \sigma_x^s = const. \quad (31)$$

Этот результат указывает на то, что в случае пластического течения основной грунтоподобной породы напряжения в вязкоупругой армирующей матрице (4) остаются постоянными.

В этом случае равенство (2) принимает канонический вид:

$$\left(E_1 + E_2 / \eta \right) \sigma_x^r = E_1 \left[\left(d\varepsilon_x^r / dt \right) + E_2 \varepsilon_x^r / \eta \right] \rightarrow d\varepsilon_x^r / dt + D_1 \varepsilon_x^r = F_1, \quad (32)$$

где $D_1 = E_2 / \eta$; $F_1 = \sigma_x^r \left[\left(E_1 + E_2 \right) / E_1 \eta \right]$.

Начальные условия имеют следующий вид:

$$\varepsilon_x^r(t=0) = \varepsilon_0^r, \quad (33)$$

где ε_0^r – начальные деформации в армирующей матрице в момент времени $t=0$. Время t замеряется от начала пластического течения.

Решение уравнения (32) с начальными условиями (33) имеет вид [16]:

$$\varepsilon_x^r = \left(\varepsilon_0^r - \sigma_x^r / E^* \right) e^{-E_2 t / \eta} + \sigma_x^r / E^*, \quad (34)$$

где $E^* = \left(E_1 E_2 \right) / \left(E_1 + E_2 \right)$.

Модуль деформации E^* характеризует запаздывающую упругую реакцию материала при $t \rightarrow \infty$ [15].

Функция λ , появляющаяся в уравнениях (24)–(26) может быть определена из уравнений (24) и (34). Необходимо отметить, что скорость деформации (28) можно записать как:

$$d\varepsilon_x^p / d\xi, \quad (35)$$

где ξ – некоторый монотонно возрастающий параметр [16].

В классической теории пластичности не рассматривается процесс пластического течения, который зависит от реального времени. В рассматриваемом случае пластическое течение грунтоподобной составляющей контролируется вязкоупругими деформациями армирующей составляющей. Тогда пластическое течение зависит от реального времени и можно заменить $\xi = t$ в уравнении (35). Это наблюдение позволяет определить функцию λ и, впоследствии, пластические деформации армогрунтоподобного материала. Из этих результатов можно сделать заключение о том, что твердые бытовые отходы ведут себя в макроскопическом масштабе как вязкопластичный материал [16].

Несложные математические преобразования уравнений (24), (32), (34) приводят к следующему выражению:

$$\lambda = \frac{E_2 \left(\varepsilon_0^r - \frac{1}{E^*} \sigma_x^r \right) e^{-\frac{E_2 t}{\eta}}}{2\eta \left[\sigma_y (1 + \sin^2 \phi) - \sigma_x^s \cos^2 \phi \right]}. \quad (36)$$

Заключение

Реологическая модель ТБО позволяет прогнозировать развитие напряженно-деформированного состояния массива отходов во времени и затухание осадок. Надежность прогноза зависит от достоверности показателей физико-механических свойств и реологических характеристик механической ползучести и биологического разложения отходов, определяемых в ходе полевых и лабораторных испытаний.

Список библиографических ссылок

1. Офрихтер В.Г. Особенности классификации твердых отходов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: «Строительство и архитектура». – Волгоград: ВолГАСУ, 2009, вып. 14 (33). – С. 33-37.
2. Офрихтер В.Г., Лихачева Н.Н. Условие текучести твердых бытовых отходов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: «Строительство и архитектура». – Волгоград: ВолГАСУ, 2012, вып. 29 (48). – С. 136-142.
3. Офрихтер В.Г., Лихачева Н.Н. Упругая модель твердых бытовых отходов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: «Строительство и архитектура». – Волгоград: ВолГАСУ, 2013, вып. 32 (51). – С. 33-41.
4. Офрихтер В.Г., Лихачева Н.Н. Упругопластическая модель твердых бытовых отходов // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – Екатеринбург, 2013, вып. 2. – С. 86-90.
5. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: АСВ, 1994.
6. Bathrust R.J. Geosynthetics for reinforcement applications in retaining walls // Proceedings of 44 Canadian Geotechnical Conference. – Calgary, 1991, Vol. 2. – P. 1-10.
7. Bathrust R.J. Case study of a monitored propped panel wall // J.T.H. Wu (eds) Geosynthetic – Reinforced Soil Retaining Walls. – Rotterdam: Balkema, 1992. – P. 159-166.
8. Benigni C. Construction and performance of an experimental large scale wall reinforced with geosynthetics / C. Benigni, G. Bosco, D. Cazzuffi, R. De Col // H. Ochiai, N. Yasufuku, K. Omnie (eds) Earth Reinforcement. – Rotterdam: Balkema, 1996. – P. 315-320.
9. Djarwadi D. Construction and performance of spillway walls for Makakuning Dam / D. Djarwadi, I.H. Wong // Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. – Singapore, 1994. – P. 289-292.
10. Edgers, L. 1992. A biological model for longterm settlement in landfills. / Edgers, L., Noble, J.J., Williams, E. // Proceedings of Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology. – Rotterdam: A.A.Balkema, 1992. – P.179-184.

11. König D. Zur Beurteilung der Standsicherheit und zur Prognose von Mischabfalldeponien. / D. König, R. Kockel, H.L. Jessberger // Priihs, H., Mullner, B. (hrsg.): 12 Nürnberger Deponieseminar «Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien». – Eigenverlag LGA, Germany, 1996. – P. 93-118.
12. Manassero M., Van Impe W.F., Bouazza A. Waste Disposal and Containment // Preprint of Special Lectures and State-of-the-Art Reports for 2nd International Congress on Environmental Geotechnics. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1996. – P. 193-242.
13. Park H.I., Park B. Prediction of MSW long-term settlement induced by mechanical and decomposition-based compression // International Journal of Environmental Research. – Tehran, Iran: University of Tehran, 2009, Vol. 3, Iss. 3. – P. 335-348.
14. Sawicki A. Mechanical analogues of soil compaction and associated phenomena // Journal Studia Geotechnica et Mechanica. – Wrocław, 1996, Iss. XVIII (3-4). – P. 3-17.
15. Sawicki A., Kazimierowicz-Frankowska K. Creep behaviour of geosynthetics // Geotextiles and Geomembranes, 1998, Iss.16 (6). – P. 365-382.
16. Sawicki A. Mechanics of reinforced Soil. – Rotterdam: A.A. Balkema, 2000.

Ofrikhter V.G. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: ofrikhter@mail.ru

Likhacheva N.N. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: olga@pstu.ru

Perm National Research Polytechnical University

The organization address: 614990, Russia, Perm, Komsomolsky av., 29

Rheological model of municipal solid waste

Resume

Municipal solid waste (hereinafter MSW) represent the material similar to reinforced soil, for which the soil mechanic rules could be applied. During the study of MSW reinforced soil-like materials it is important to investigate the time-dependent phenomenas such as creep or stress relaxation. At general description of reinforced soil-like material the rheological propeties of reinforced matrix should be taken into account. The creep of reinforcement significantly influences on the general behaviour of reinforced soil-like material.

During the research of reinforced soils and reinforced soil-like materials it is important to investigate such time-dependent effects as creep and stress relaxation. In general description of reinforced soil-like material, rheological properties of reinforced matrix should be taken into account. Creepage of the reinforcement has a significant effect on general behaviour of reinforced soil-like mass.

Two types of behaviour are intrinsic to the simple model of elasto-plastic soil-like basic stratum of MSW, reinforced by viscous-elastic reinforced matrix. The first type corresponds to elastic soil-like stratum (type E-V) and second – to the plastic stratum (type P-V). For the description of elastic range of behaviour of soil-like stratum Hook law is accepted and for the description of its plastic properties – Mohr-Coulomb yield condition with associated flow rule. The reinforced matrix performance is intended in one horisontal direction, which corresponds to the structure of MSW, forming during the waste placement

The rheological model of MSW allows to predict the development of stress-strain state of waste body in time as well as settlement attenuation. The reliability of prediction depends on autheticity of the figures of physico-mechanical properties and rheological characteristics of mechanical creep and biological decay of waste, determined during the field and laboratory testing.

Keywords: municipal solid waste, reinforced soil-like material, rheological model.

Reference list

1. Ofrikhter V.G. Peculiar features of solid waste classification // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture. – Volgograd: VolgGASU, 2009, Iss. 14 (33). – P. 33-37.

2. Ofrikhter V.G., Likhacheva N.N. Conditions for solid waste flow // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture. – Volgograd: VolgGASU, 2012, Iss. 29 (48). – P. 136-142.
3. Ofrikhter V.G., Likhacheva N.N. Elastic model of solid household wastes // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture. – Volgograd: VolgGASU, 2013, Iss. 32 (51). – P. 33-41.
4. Ofrikhter V.G., Likhacheva N.N. Elasto-plastic model for municipal solid waste // Academic bulletin of URALNIIPROEKT RAASN. – Yakaterinburgh, 2013, Iss. 2. – P. 86-90.
5. Ukhov S.B. Soil mechanics, bases and foundations / S.B. Ukhov, V.V. Semenov, V.V. Znamenskii, Z.G. Ter-Martirosian, S.N. Chernyshev – M.: ASV, 1994.
6. Bathrust R.J. Geosynthetics for reinforcement applications in retaining walls // Proceedings of 44 Canadian Geotechnical Conference. – Calgary, 1991, Vol. 2. – P. 1-10.
7. Bathrust R.J. Case study of a monitored propped panel wall // J.T.H. Wu (eds) Geosynthetic – Reinforced Soil Retaining Walls. – Rotterdam: Balkema, 1992. – P. 159-166.
8. Benigni C. Construction and performance of an experimental large scale wall reinforced with geosynthetics / C. Benigni, G. Bosco, D. Cazzuffi, R. De Col // H. Ochiai, N. Yasufuku, K. Omnie (eds) Earth Reinforcement. – Rotterdam: Balkema, 1996. – P. 315-320.
9. Djarwadi D. Construction and performance of spillway walls for Makakuning Dam / D. Djarwadi, I.H. Wong // Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. – Singapore, 1994. – P. 289-292.
10. Edgers L., Noble J.J., Williams E. A biological model for longterm settlement in landfills. // Proceedings of Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1992. – P. 179-184.
11. König D., Kockel R., Jessberger H.L. Zur Beurteilung der Standsicherheit und zur Prognose von Mischabfalldeponien. // Priihs, H., Mullner, B. (hrsg.): 12 Nürnberger Deponieseminar «Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien». – Eigenverlag LGA, Germany, 1996. – P. 93-118.
12. Manassero M., Van Impe W.F., Bouazza A. Waste Disposal and Containment // Preprint of Special Lectures and State-of-the-Art Reports for 2nd International Congress on Environmental Geotechnics. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1996. – P. 193-242.
13. Park H.I., Park B. Prediction of MSW long-term settlement induced by mechanical and decomposition-based compression // International Journal of Environmental Research. – Tehran, Iran: University of Tehran, 2009, Vol. 3, Iss. 3. – P. 335-348.
14. Sawicki A. Mechanical analogues of soil compaction and associated phenomena // Journal Studia Geotechnica et Mechanica. – Wrocław, 1996, Iss. XVIII (3-4). – P. 3-17.
15. Sawicki A., Kazimierowicz-Frankowska K. Creep behaviour of geosynthetics // Geotextiles and Geomembranes, 1998, Iss. 16 (6). – P. 365-382.
16. Sawicki A. Mechanics of reinforced Soil. – Rotterdam: A.A. Balkema, 2000.