УДК 624.131

В.Г. Офрихтер, Я.В. ОфрихтерПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ПРИМЕНЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАССИВА
ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

В настоящее время всё чаще возникает потребность в оценке устойчивости увеличивающихся массивов твердых бытовых отходов (ТБО) на городских свалках. Применение современных неразрушающих методов исследования – многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) – позволяет оперативно оценить напластование и механические свойства проблемных грунтов и грунтоподобных материалов.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, неразрушающие методы исследования многоканальный анализ поверхностных волн (МАПВ).

V.G. Ofrikhter, I.V. Ofrikhter

Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation

**APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE METHODS
FOR FIELD INVESTIGATION OF A MUNICIPAL SOLID
WASTE MASSIF**

Nowadays the need for stability estimation of growing massives of municipal solid wastes at city dumps arises more often. Application of up-to-date nondestructive method of investigation – multichannel analysis of surface waves (MASW) allows to estimate the profile and mechanical characteristics of problematic soils and soil-like materials.

Keywords: municipal solid waste; nondestructive research methods; multichannel analysis of surface waves (MASW).

Введение

Твердые бытовые отходы (ТБО) являются специфическим типом грунтоподобного материала. В соответствии с экспериментальными результатами массив твердых бытовых отходов может рассматриваться как композитный материал, включающий два компонента – *основную материнскую породу*, состоящую из мелко- и среднезернистых частиц

(в большинстве своем грунтоподобных) и характеризующуюся фрикционным поведением, и *армирующую матрицу*, включающую фиброподобные компоненты отходов. В этом случае смешанные ТБО могут быть смоделированы подобно грунту, армированному произвольно ориентированными фибрами [2].

Свалки мусора всегда располагаются вблизи населенных пунктов и занимают значительные территории, которые безвозвратно выводятся из хозяйственного оборота. В связи с перманентным процессом образования мусора площадь свалок постоянно увеличивается. В последние годы появилась тенденция увеличения вместимости свалок по схеме высоконагруженных полигонов высотой 20 м и более. При увеличении высоты складирования мусора возрастают как нагрузки на основание, так и напряжения в массиве отходов. В связи с этим возникает потребность в оценке устойчивости таких массивов, для чего требуются физико-механические характеристики отходов и прогноз их изменений во времени.

Отбор проб материала массива ТБО ненарушенной структуры практически невозможен, что создает определенные трудности при определении его механических свойств, необходимых для расчетов [1]. Надежные механические характеристики ТБО можно получить только полевыми методами. При точечном определении характеристик отходов возможен большой разброс результатов. Кроме того, мусор относится к особым материалам, работа с которыми требует повышенных мер безопасности, на которые накладываются санитарно-гигиенические ограничения.

Таким образом, имеет существенные преимущества применение современных неразрушающих методов определения механических свойств отходов в полевых условиях. Одним из них является метод многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) [4]. Он позволяет выполнять измерения в зоне малых скоростей верхней части разреза. Это самый экономичный и быстрый метод, поскольку он не требует бурения скважин и все измерения могут проводиться с поверхности грунта. Он хорошо подходит для полевых исследований грунтов и грунтоподобных материалов, отбор и восстановление образцов ненарушенной структуры которых практически невозможны. К ним относятся твердые бытовые отходы.

При использовании метода МАПВ данные по геологическому разрезу обычно получают как средние значения по заданной глубине, что хорошо подходит для исследований однородных массивов твердых бытовых отходов.

Оборудование для многоканального анализа поверхностных волн

Для регистрации поверхностных волн была применена телеметрическая сейсморазведочная 24-канальная система ТЕЛСС-3, предназначенная для проведения малоглубинных исследований с различными источниками сейсмических возбуждений с записью зарегистрированной информации в компьютер в цифровой форме в формате SEG-Y.

Описание опытной площадки

Изучение разреза участка складирования бытовых отходов методом МАПВ осуществлялось на полигоне ТБО в пригороде г. Перми. Для исследований была выбрана площадка на вершине массива ранее уложенных отходов размером в плане 115×145 м и высотой около 7,5 м (рис. 1, 2).

По результатам инженерно-геологических изысканий основанием полигона служит слой коричневой легкой тугопластичной глины мощностью 1,7 м со следующими характеристиками:

- плотность 1,87 г/см³;
- плотность твердых частиц 2,74 г/см³;
- влажность 26,1 %;
- коэффициент фильтрации 0,0066 м/сут;
- угол внутреннего трения 16°;
- удельное сцепление 52 кПа.

Глина подстилается слоем тяжелого пылеватого тугопластичного суглинка мощностью 3,4 м со следующими характеристиками:

- плотность 1,89 г/см³;
- плотность твердых частиц 2,70 г/см³;
- влажность 28,7 %;
- угол внутреннего трения 14°;
- удельное сцепление 19 кПа.

Подземные воды типа «верховодки» встречены на глубине 2,0–2,5 м (на отметках 260,80–260,98 м в Балтийской системе высот).

Рис. 1. Общий вид массива отходов

Рис. 2. Топографическая съемка опытной площадки
(– линия наблюдения)

Методика исследований методом многоканального анализа поверхностных волн

Для регистрации поверхностных волн применялась продольная профильная фланговая система наблюдения ZZ с выносом 10 м. Количественные характеристики системы приведены в табл. 1. Ее общий вид со стороны первого пункта возбуждения представлен на рис. 3.

Количественные характеристики фланговой системы наблюдения

№ п/п	Обозначение	Наименование характеристики	Значение
1	N	Кратность	4
2	L	База наблюдений	48
3	NC	Число каналов регистрирующей станции	24
4	$X_{\min}$	Минимальное расстояние ПП от ПВ	10
5	$X_{\max}$	Максимальное расстояние ПП от ПВ	58
6	SI	Интервал возбуждения	8
7	RI	Шаг наблюдений, м	2
8	R	Вынос, м	10
9	ND	Плотность ПВ на 1 км	125

Рис. 3. Общий вид системы наблюдения на ПВ-1

Запись осуществлялась в шести режимах с периодами дискретизации 0,5 и 1,0 мс и с длиной записи 1024, 2048 и 4096 отсчетов. В связи с низким уровнем внешних шумов был принят 4-кратный стэкинг.

Внешняя синхронизация осуществлялась по замыканию при чувствительности, равной 1. Сигнал на запись передавался системой беспроводной синхронизации СБС-1. Данные на компьютер передавались через интерфейс Wi-Fi.

Перед началом полевых измерений на каждом пункте возбуждения проводился тест сейсмических кос и полный тест сейсмостанции. Полный тест сейсмостанции включает в себя контроль основных параметров сейсмического канала, таких как шум, коэффициент нелинейных искажений, амплитудная и фазовая неидентичность, взаимное влияние, ослабление синфазного сигнала. Для контроля сейсмических кос определялись: коэффициент нелинейных искажений, количество подключенных сейсмоприемников на один канал и сопротивления сейсмоприемников.

После завершения наблюдений и записи на каждом пункте возбуждения вся система, включавшая расстановку из 24 каналов и пункт возбуждения, переносилась на 8 м. Точка записи при реализации такой системы наблюдений относится к центру расстановки.

Результаты исследований методом МАПВ

В результате сейсморазведочных наблюдений сейсмические сигналы были зарегистрированы и записаны в память управляющего персонального компьютера. Первичная обработка материалов и суммирование сейсмограмм проводились с помощью управляющей программы ТЕЛСС-WiFi (входящей в комплект поставки сейсмостанции) непосредственно в момент измерений. На рис. 4 представлена исходная сейсмограмма, полученная на первом пункте возбуждения (ПВ-1).

Дальнейшая обработка и интерпретация материала выполнялись в пакете программ RadExPro Basic. На первом этапе в программном модуле «Загрузка данных и присвоение геометрии» выполнялись загрузка исходных файлов сейсмограмм в формате SEG-Y, чтение данных, присваивание геометрии, запись в базу данных и визуализация. На рис. 5 представлены сейсмограммы на пунктах возбуждения ПВ-1–ПВ-4, визуализированные в программе RadExPro.

На втором этапе обработки в программном модуле MASW* выполнялся дисперсионный анализ. На каждую полученную сейсмограмму рассчитывалось дисперсионное изображение, из которого «извлекалась» дисперсионная кривая путем пикировки изображения по максимуму амплитуд.

Рис. 4. Исходная сейсмограмма на ПВ-1

Рис. 5. Исходные сейсмограммы на пунктах возбуждения с ПВ-1 по ПВ-4, визуализированные программой RadExPro

На рис. 6 представлено дисперсионное изображение, полученное для пункта возбуждения ПВ-1 при периоде дискретизации 0,5 мс и длине записи 2048 отсчетов (общее время записи составляло 1 с).

Рис. 6. Дисперсионное изображение на ПВ-1 и пропикированная по максимумам амплитуд кривая

На втором этапе обработки в программном модуле MASW* выполнялся дисперсионный анализ. На каждую полученную сейсмограмму рассчитывалось дисперсионное изображение, из которого «извлекалась» дисперсионная кривая путем пикировки изображения по максимуму амплитуд. На рис. 6 представлено дисперсионное изображение, полученное для пункта возбуждения ПВ-1 при периоде дискретизации 0,5 мс и длине записи 2048 отсчетов (общее время записи составляло 1 с).

После пикировки изображения на ПВ-1 обрабатывались дисперсионные изображения на остальных пунктах возбуждения. Затем все «пропикированные» кривые подавались в компьютерной программе RadExPro на вход процедуры инверсии.

До подбора кривых задавалась начальная модель среды. Глубина полупространства задавалась исходя из половины максимальной длины волны. Максимальная длина волны определялась из дисперсионного изображения. На рис. 6 крайняя точка кривой имеет частоту 5 Гц и фазовую скорость около 160 м/с, что соответствует длине волны, примерно равной 32 м.

Была задана глубина полупространства 15 м. Коэффициент Пуассона материала отходов, установленный в полевых условиях методом

сейсмического каротажа (СК), составил 0,32. Плотность отходов, определенная на образцах в извлекаемой гильзе была равной $0,887 \text{ т/м}^3$.

Далее в автоматическом режиме выполнялась инверсия – нахождение профиля поперечных скоростей, теоретическая дисперсионная кривая которого была максимально приближена к измеренной кривой. Двумерный профиль скоростей поперечных волн строился интерполяцией между полученными вертикальными профилями (рис. 7).

Рис. 7. Профиль скоростей поперечных волн между серединными точками расстановки

Анализ профиля поперечных скоростей

На рис. 7 отчетливо видны три слоя, верхний из которых является толщей отходов со скоростью волн сдвига 110 м/с. Ниже залегает верхний слой основания полигона из легкой тугопластичной глины, под ним – тяжелый пылеватый тугопластичный суглинок. Средняя скорость сдвиговых волн в первом от поверхности слое составила 110 м/с, во втором – 150 м/с, в третьем – 260 м/с.

По известной скорости сдвиговых волн V_s можно рассчитать модуль сдвига отходов $G_{\text{ТБО}}$ при малых деформациях (начальный модуль сдвига) по следующей формуле [3]:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{\text{отбо}}}{\rho}} \Rightarrow G_{\text{отбо}} = V_s^0 \cdot \rho,$$

где ρ – плотность ТБО, т/м³.

В нашем случае $G_{\text{отбо}} = 110^2 \cdot 0,887 = 10732$ кПа.

Далее по известным значениям модуля сдвига при малых деформациях и коэффициента Пуассона можно рассчитать модуль Юнга при малых деформациях и одометрический модуль.

Заключение

Метод многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) является самым недорогим и быстрым способом полевых испытаний грунтов и грунтоподобных материалов, отбор и восстановление образцов которых с ненарушенной структурой невозможны. К таким типам материалов относятся твердые бытовые отходы.

Метод МАПВ является неразрушающим, не требует бурения скважин (все измерения проводятся с поверхности), хорошо подходит для изучения однородных массивов твердых бытовых отходов. Все полевые работы этим методом выполняются звеном из 1–2 человек. Весь комплект используемой при этом аппаратуры весит порядка 40 кг и легко доставляется вручную в любую точку наблюдений. Результаты такого исследования могут использоваться непосредственно при расчетах массива ТБО (полученные значения модуля сдвига при малых деформациях и модуля Юнга являются входными параметрами идеальной упругопластической модели Кулона – Мора, широко применяемой в компьютерном моделировании [5]).

Список литературы

1. Офрихтер В.Г. Особенности классификации твердых отходов // Вестник Волгоград. Гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – 2009. – Вып. 14 (33). – С. 33–37.
2. Офрихтер В.Г., Лихачева Н.Н. Условие текучести твердых бытовых отходов // Вестник Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – 2012. – Вып. 29 (48). – С. 136–142.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979.
4. Park C.B., Muller R.D., Miura H. Optimum field parameters of an MASW Survey // Japanese Society of Exploration Geophysicists (SEG-J) Extended Abstracts (22–23 May 2002). – Tokyo, Japan, 2002.

5. Brinkgreve R.B.J. Material models // Plaxis 2D – Version 8. – Rotterdam: A.A.Balkema, 2002. – P. 6–1 – 6–20.

References

1. Ofrikhter V.G. Osobennosti klassifikatsii tverdykh otkhodov [Peculiar features of solid waste classification]. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architectur.* 2009, vol. 14 (33). pp. 33-37.

2. Ofrikhter V.G., Likhacheva N.N. Uslovie tekuchesti tverdykh bytovykh otkhodov [Yield condition for municipal solid waste]. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture*, 2012. no. 29 (48). pp. 136-142.

3. Timoshenko, S., Goodier, J.N. Theory of elasticity. McGraw-Hill, New York; Toronto; London, 1951. 506 p.

4. Park C.B., Muller R.D., Miura H. Optimum field parameters of an MASW. *Yapanese Society of Exploration Geophysicists (SEG-J) Extended Abstracts (22–23 May 2002)*, Tokyo, Yapan, 2002.

5. Brinkgreve R.B.J. Material models. Plaxis 2D. Version 8. Rotterdam: A.A. Balkema, 2002. pp. 6-1–6-20.

Сведения об авторах

Офрихтер Вадим Григорьевич (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ofrikhter@mail.ru

Офрихтер Ян Вадимович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета.

About the authors

Ofrikhter Vadim Grigorievich (Perm, Russia) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnical University; e-mail: ofrikhter@mail.ru

Ofrikhter Yan Vadimovich (Perm, Russia) – Student, Perm National Research Polytechnic University.

Получено 11.04.2014