

Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ОБОСНОВАНИЕ МАССЫ ПРОБЫ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИХ СОСТАВА

Приводится обоснование минимально достаточной массы пробы твердых бытовых отходов для исследований их морфологического состава с учетом значительной гетерогенности ТБО по природе компонентов, размерам отдельных частиц и их распределения в массиве отходов. Приведен сравнительный анализ имеющихся подходов к определению массы пробы при исследованиях не только состава ТБО, но и сходных гетерогенных материалов (руд, топлив и т.п.).

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, морфологический состав отходов, анализ состава ТБО, масса пробы, отбор проб отходов.

G.V. Il'inykh, V.N. Korotaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

SUBSTANTIATION OF MINIMUM SAMPLE MASS OF MUNICIPAL SOLID WASTE FOR COMPOSITION ANALYSIS

The article describes substantiation of minimum sample mass of municipal solid waste for composition analysis considering their high heterogeneity in the nature of components, the size of individual particles and their distribution in the mass. A comparative analysis of existing approaches to sample mass definition not only of solid waste, but also of other heterogeneous materials (ores, fuels, etc.) is given.

Keywords: municipal solid waste, waste composition, waste composition analysis, sample mass, waste sampling.

Введение

Натурные исследования состава и свойств твердых бытовых отходов (ТБО) приобретают все большую актуальность в связи с развитием технологий по извлечению их ресурсного потенциала – сортировке и переработки вторичного сырья, получения и использования вторичного топлива. Морфологический (компонентный) состав ТБО является ключевой характеристикой, так как, по сути, содержание отдельных компонентов (бумаги, стекла, металлов) определяет все остальные свойства: плотность, влажность, теплоту сгорания и т.д. [1–3].

Порядок выполнения исследований морфологического состава ТБО содержится в следующих документах:

– Методика исследования свойств твердых отходов (М.: Стройиздат, 1970);

– ПНД Ф 16.3.55–08 «Твердые бытовые отходы. Определение морфологического состава гравиметрическим методом».

Однако детальный анализ данных рекомендаций при выполнении натурных исследований выявил, что указанные требования по выполнению отбора проб не обоснованы и противоречат здравому смыслу; так, в соответствии с ПНД Ф 16.3.55–08 масса усредненной пробы для исследований состава ТБО должна составлять всего 2 кг. Для сравнения: вес одной стеклянной бутылки, типичной составляющей ТБО, – 350–400 г. Логично, что масса пробы должна зависеть от природы исследуемого материала – чем крупнее отдельные частицы материала и чем реже встречается искомый признак, тем больше материала должно быть отобрано для исследований. Другими словами, при обосновании массы пробы должна учитываться гетерогенность материала.

В связи с этим разработка алгоритма обоснования массы пробы для исследований морфологического состава ТБО представляется актуальной задачей.

Методы

Большинство методических рекомендаций по отбору проб и исследованиям различных материалов содержат значения минимальной массы пробы без обоснования порядка их расчета, однако в ряде случаев приводится порядок их определения.

Так, ГОСТ Р 52911–2008 (ИСО 589:2003, ИСО 5068-1:2007) «Топливо твердое минеральное. Методы определения общей влаги» содержит рекомендации по соблюдению соотношений между максимальными размерами кусков топлива (крупностью) и минимальной массой проб. В частности, при размере наибольших кусков топлива до 300 мм минимальная масса пробы для определения общей влажности должна быть не менее 3000 кг, при размере до 2,8 мм – 0,65 кг.

По ГОСТ 28192–89 «Отходы цветных металлов и сплавов. Методы отбора, подготовки проб и методы испытаний» минимальная масса точечной пробы зависит от размера максимального куска: до 1 мм – 0,1 кг, от 100 мм – 3,5 кг. Минимальное число точечных проб в зависимости от массы и однородности партии составляет от 3 до 51.

ГОСТ 15054–80 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения содержания влаги» содержит формулу для расчета минимальной массы пробы:

$$m = \frac{h \cdot b}{2} 3d_{\max} \cdot \rho, \quad (1)$$

где m – минимальная масса точечной пробы, кг; h – высота слоя руды в средней части ленты, м; b – ширина слоя руды, м; d_{\max} – размер максимального куска, м; ρ – насыпная плотность руды, кг/м³.

Рекомендуемая масса пробы составляет от 0,1 до 8,0 кг.

Минимальное число точечных проб (n) в зависимости от заданной погрешности отбора проб вычисляют по формуле

$$n = \left(\frac{K \cdot \sigma}{\beta_{\text{отб}}} \right)^2, \quad (2)$$

где K – коэффициент, равный 2 при 95%-ной вероятности; σ – среднее квадратическое отклонение содержания железа в руде, %; $\beta_{\text{отб}}$ – погрешность отбора проб, %.

Минимальное число точечных пробы составляет от 8 до 182.

Таким образом, в методических рекомендациях прослеживаются зависимость массы пробы от размера отдельных частиц исследуемого материала и зависимость числа проб от его однородности.

Результаты и обсуждение

Перечень определяемых компонентов (табл. 1) актуализирован с учетом состава современных ТБО – выделено 12 категорий, 25 подкатегорий, 55 компонентов. Идентификация 12 категорий достаточна для получения общих представлений о структуре отходов и возможных направлений их использования.

Для определения ресурсного потенциала отходов по одному конкретному направлению переработки отходов могут быть использованы сокращенные перечни определяемых компонентов, в которых приоритетные категории материалов исследуются с разбивкой на компоненты, а содержание малозначимых для данного направления использования отходов исследуется только на уровне категорий. Таким образом, фор-

мируется перечень определяемых компонентов, в котором выделяют значимые компоненты, т.е. те, содержание которых имеет ключевое значение для дальнейших расчетов.

Таблица 1

Полный перечень определяемых компонентов

Категория	Подкатегория (компонент)
Органические отходы	Пищевые отходы (растительные остатки и очистки, кости и животные остатки), растительные отходы (листва и трава, прочие растительные отходы)
Макулатура	Картон (гофрокартон, картон мелкий), бумага (офисная бумага, газетная бумага, книги и тетради в обложке, глянцевая бумага), прочая макулатура (гигиеническая бумага, сильно загрязненная бумага)
Полимеры	Пленка (ПЭ-пленки прозрачные, ПП-пленки прозрачные, ПЭ-пленки цветные, ПП-пленки цветные, металлизированные пленки, многослойные пленки), бутылка (ПЭТ-бутылка прозрачная, ПЭТ-бутылка зеленая, ПЭТ-бутылка синяя, ПЭТ-бутылка темная, ПЭ-бутылка бытовая, ПЭ-бутылка пищевая), прочая упаковка (полипропиленовая упаковка, полипропиленовые мешки, полистирольная упаковка), прочие полимеры (ПВХ, прочие пластмассы)
Стекло	Стеклотара (стеклотара прозрачная, стеклотара зеленая и синяя, стеклотара темная), прочее стекло
Металлы	Черные металлы (черный металлолом, жестяная банка), цветные металлы (цветной металлолом, алюминиевая банка)
Текстиль	Текстиль (одежда, прочий текстиль)
Дерево	Дерево (деревянная упаковка, прочая древесина)
Комбинированные материалы	Комбинированная упаковка типа «тетрапак», электронные отходы, прочие комбинированные материалы
Опасные материалы	Опасные материалы (элементы электропитания, ртутьсодержащие отходы, краски и растворители, медицинские отходы, прочие опасные материалы)
Инертные материалы	Строительные отходы, прочие инертные материалы
Прочее	Подгузники, изделия из кожи, резины, обувь
Отсев	Отсев

Минимальная масса пробы ТБО зависит от перечня компонентов – для каждого компонента может быть определена минимальная масса пробы, которая будет достаточна для достоверного определения его содержания. Учитывая важность данных о содержании в ТБО каждого из

них (одни компоненты имеют принципиальное значение при дальнейшем обосновании системы обращения с отходами, содержание других приводится скорее справочно), необходимо в общем перечне компонентов выделить перечень значимых компонентов, для которых и требуется рассчитать минимальную массу пробы. Для большинства технологий обращения с отходами в перечень значимых компонентов необходимо включить органические отходы, макулатуру, полимеры, стекло и металлы с учетом принятого уровня определения морфологического состава ТБО.

Для расчета минимальной массы пробы гетерогенного материала в теории отбора проб [4, 5] используется следующая формула:

$$(CV)^2 = Cd^3 \left(\frac{1}{M^{\text{sam}}} - \frac{1}{M^{\text{lot}}} \right), \quad (3)$$

где CV – коэффициент вариации, д. ед.; C – постоянная отбора проб, кг/м³; d – номинальный верхний размер частицы, м; M^{sam} – масса пробы, кг; M^{lot} – масса партии исследуемого материала, кг.

После выполнения необходимых преобразований формулы (3) и подстановок получено следующее соотношение для i -го компонента ТБО:

$$M_i^{\text{sam}} = (d_{95i})^3 f_i g_i \rho_i \frac{(1 - c_i^{\text{ex}})}{(CV_i)^2 c_i^{\text{ex}}}, \quad (4)$$

где M_i^{sam} – минимальная масса пробы, достаточная для определения i -го компонента, кг; d_{95i} – номинальный верхний размер частицы i -го компонента, м; f_i – коэффициент формы i -го компонента (учитывает, насколько форма частицы отличается от куба), д. ед.; g_i – гранулометрический коэффициент для i -го компонента (учитывает распределение частиц по размеру), д. ед.; ρ_i – средняя (с учетом пор) плотность частиц i -го компонента, кг/м³; c_i^{ex} – вероятное содержание частиц i -го компонента, кг/кг; CV_i – коэффициент вариации i -го компонента, д. ед.

В соответствии с формулой (4) рассчитывается минимальная масса пробы по каждому значимому компоненту, максимальное из полученных значений принимается в качестве минимальной массы пробы всего исследования.

Номинальный верхний размер частицы является размером отверстия сита для фракции определенного размера. Рекомендуемый размер ячейки сит для исследований фракционного состава ТБО: основной ряд – 250, 100, 50, 25 мм; дополнительный ряд – 150, 80, 40, 10 мм.

Крупные фракции отходов отличаются высокой гетерогенностью по форме, размерам и плотности, ввиду чего возникают сложности с определением необходимых коэффициентов. В связи с этим на основании формулы (4) нами получено следующее соотношение, оперирующее понятием массы частиц:

$$M_i^{\text{sam}} = m_i^{\text{cp}} \frac{(1 - c_i^{\text{вер}})}{(CV_i)^2 c_i^{\text{вер}}}, \quad (5)$$

где m_i^{cp} – средняя масса частицы i -го компонента, кг.

При одновременном исследовании фракционного и морфологического состава ТБО проба отходов сначала делится на фракции разного размера, для каждой из которых определяется состав. Использование формулы (4) позволяет выполнить сокращение массы мелких фракций отходов для исследований их состава. Кроме того, установлено, что распределение частиц по размеру зависит от природы компонента: в частности, пищевые отходы представлены преимущественно мелкими частицами, макулатура – равномерно во всех фракциях (рис. 1), а некоторые компоненты в мелких фракциях отсутствуют (ПЭТ-бутылка, картон и т.п.).

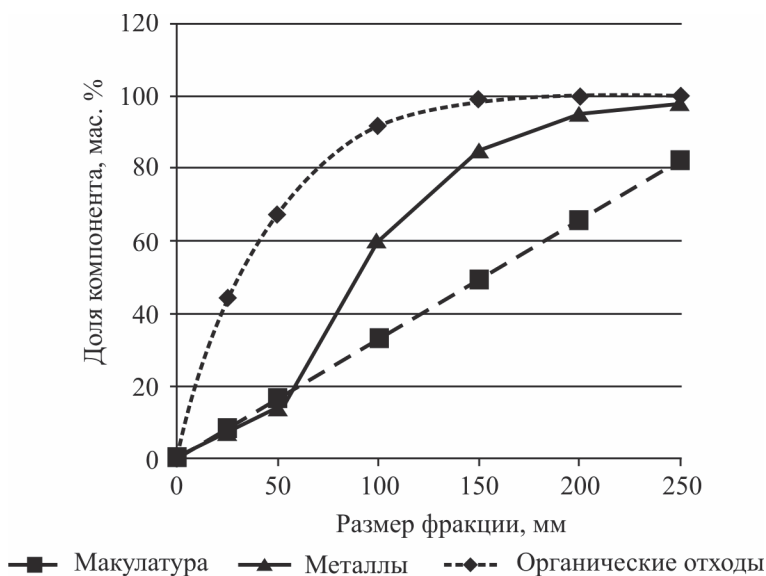


Рис. 1. Графики распределения некоторых компонентов по размеру

Указанное распределение и исследования всех коэффициентов в формуле (4) позволяют обосновать минимальную массу пробы для основных мелких фракции.

В соответствии с формулой (5) выполнены расчеты минимальной массы пробы, которые сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчеты минимальной массы для разных перечней определяемых компонентов

Список компонентов	Минимальная масса пробы, кг			
	исходя из средних значений содержания с точностью 0,1 %		исходя из точности исследований (в скобках)	
	с учетом всех компонентов	с учетом значимых компонентов*	с учетом всех компонентов	с учетом значимых компонентов*
12 категорий	1531**	55	480 (1%)	450 (1 %)
25 подкатегорий	1531**	137	42218 (0,1 %)	5052 (0,1 %)
55 компонентов	3152**	894	79103 (0,01 %)	52236 (0,01 %)
Перечень для оценки потенциала вторичного сырья (41 компонент)	1531**	894	5219 (0,1 %)	5219 (0,1 %)
Перечень для оценки биологического потенциала (32 компонента)	1531**	168	4840 (0,1 %)	4537 (0,1 %)
Перечень для оценки энергетического потенциала (12 компонентов)	1531**	525	4840 (0,1 %)	4537 (0,1 %)

* Органические отходы, макулатура, полимеры, стекло, металлы.

** По опасным материалам.

Как следует из табл. 1, минимальная масса пробы для оценки содержания значимых компонентов значительно меньше, чем масса пробы с учетом полного перечня компонентов.

Расчет минимальной массы пробы для мелких фракций приведен в табл. 3.

Общее количество проб, усредняемых для получения результатов морфологического состава отходов, составляет 35. С учетом рассчитанной минимальной массы пробы для исследований состава ТБО на уровне компонентов (55 кг) получена зависимость, представленная на рис. 2.

Таблица 3

Обоснование массы пробы для мелких фракций

Размер фракции	Минимальная масса пробы, кг			
	<100 мм	<80 мм	<50 мм	<40 мм
Органические отходы	5,0	2,6	0,6	0,3
Макулатура	3,7	1,9	0,5	0,2
Полимеры	4,5	2,3	0,6	0,3
Стекло	33,2	17,0	4,2	2,1
Металлы	51,0	26,1	6,4	3,3
Текстиль	51,6	26,4	6,4	3,3
Дерево	37,7	19,3	4,7	2,4
Комбинированные материалы	20,4	10,5	2,6	1,3
Опасные материалы	65,3	33,5	8,2	4,2
Инертные материалы	21,0	10,8	2,6	1,3
Прочее	35,9	18,4	4,5	2,3

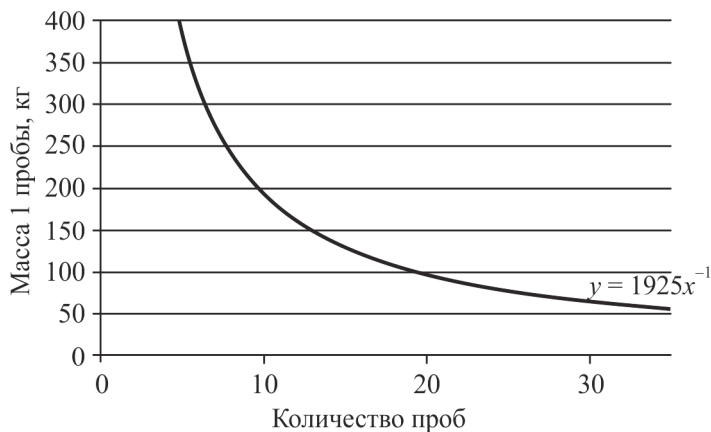


Рис. 2. Графики зависимости массы 1 пробы от общего количества проб

Таким образом, общая масса ТБО, которую необходимо рассортировать для анализа их морфологического состава, чуть меньше 2 т.

Выводы

Предложенный алгоритм расчета минимальной массы пробы твердых бытовых отходов для исследований их морфологического состава позволяет обеспечивать необходимую представительность пробы и достоверность получаемых результатов.

Приведенные результаты расчета могут быть использованы при выполнении исследований состава и свойств ТБО.

Список литературы

1. Коммунальная экология. Энциклопедический справочник / А.Н. Мирный [и др.]. – М.: Прима-Пресс-М, 2007. – 808 с.
2. Ильиных Г.В., Устьянцев Е.А., Вайсман Я.И. Построение материального баланса линии ручной сортировки твердых бытовых отходов // Экология и промышленность России. – 2013. – № 1. – С. 22–25.
3. Ильиных Г.В., Сангаджиева Т.Н. Актуальность исследований норм накопления, состава и свойств твердых бытовых отходов при разработке генеральных схем санитарной очистки населенных пунктов // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Урбанистика. – 2012. – № 3. – С. 39–48.
4. Gy P.M. Sampling of heterogeneous and dynamic material systems. – Amsterdam: Elsevier, 1992.
5. Minkkinen P. Practical applications of sampling theory // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2004. – № 74. – С. 85–94.

References

1. Mirniy A.N. [et al.] Kommunal'naya ekologiya. Entsiklopedichesky spravochnik [Municipal ecology. Encyclopedic handbook]. Moscow: Prima-Press-M, 2007, 808 p.
2. Il'inykh G.V., Ust'yantsev E.A., Vajsman Ya.I. Postroenie material'nogo balansa linii ruchnoj sortirovki tverdykh bytovykh otkhodov [Formation material balance line manual sorting of municipal solid waste]. *Jekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2013, no.1, pp. 22–25.
3. Il'inykh G.V., Sangadzhieva T.N. Aktual'noct' issledovanij norm nakopleniya, sostava i svojstv tverdykh bytovykh otkhodov pri razrabotke general'nykh skhem sanitarnoj ochistki naseleennykh punktov [Topicality of research norms of accumulation, composition and characteristics of municipal solid waste in developing master plans sanitation settlements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 3, pp. 39–48.
4. Gy P.M. Sampling of heterogeneous and dynamic material systems. Amsterdam: Elsevier, 1992.
5. Minkkinen P. Practical applications of sampling theory. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2004, no. 74, pp. 85–94.

Получено 9.10.2013

Об авторах

Ильиных Галина Викторовна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры охраны окружающей среды Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: galinka14@yandex.ru).

Коротаев Владимир Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновациям Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: korotaev@pstu.ru).

About the authors

Ilyinikh Galina Viktorovna (Perm, Russia) – Senior Lecturer, Department for Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: galinka14@yandex.ru).

Korotaev Vladimir Nikolaevich (Perm, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Science and Innovations, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: korotaev @pstu.ru).