

УДК 504.064.47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭМИССИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ПРЕТРИТМЕНТА

Слюсарь Н.Н., Вайсман Я.И., Глушанкова И.С., Рудакова Л.В.

*ФГОУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: irina_chem@mail.ru*

Представлены результаты моделирования эмиссионного потенциала твердых бытовых отходов при различных способах их предварительной подготовки: ручной и оптико-механической сортировки, аэробной стабилизации биodeградируемой фракции отходов. При расчетах эмиссий использованы результаты натурных исследований морфологического состава твердых бытовых отходов действующего полигона ТБО г. Перми, состав потоков отходов, образующихся при работе мусоросортировочной линии, и разработанные биохимические модели анаэробной деструкции ТБО и аэробной стабилизации биodeградируемых фракций отходов. Предварительная оптико-механическая сортировка отходов с последующей аэробной стабилизацией отсевов позволит снизить объемы депонируемых отходов на 58–60% и предотвратить выделение метана при деструкции. Разработанные подходы к расчету эмиссионного потенциала ТБО могут быть использованы при проектировании санитарных полигонов ТБО и прогнозной оценке их воздействия на объекты окружающей среды.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, биохимическая деструкция, модель, эмиссионный потенциал, ручная и оптико-механическая сортировка

MODELING CHANGE EMISSION POTENTIAL SOLID WASTE IN DIFFERENT WAYS PRETREATMENT

Slyusar N.N., Vaisman Y.I., Glushankova I.S., Rudakova L.V.

Federal state budgeted educational institution of high professional education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, e-mail: irina_chem@mail.ru

Based on the results of field studies of the morphological composition of municipal solid waste landfill acting Perm, composition of waste streams generated during waste sorting line manual work and opto-mechanical sorting and biochemical model developed by solid waste and destruction of aerobic stabilization of biodegradable waste fractions calculated emission potentials for different waste methods of their preparation. Preliminary optical – mechanical sorting of waste followed by aerobic stabilization of biodegradable fraction will reduce the volume of waste deposited at 58–60% and prevent the release of methane from the destruction. Developed approaches to the calculation of the emission potential of MSW can be used in the design of sanitary landfills and predictive evaluation of their impact on the environment.

Keywords: municipal solid waste, biochemical degradation model, the emission potential, hand made and optical-mechanical sorting

Утилизация твердых бытовых отходов (ТБО) является одной из ключевых санитарных и экологических проблем урбанизированных территорий. В настоящее время существуют различные схемы управления потоками ТБО, включающие раздельный сбор, ручную, механическую и/или оптико-механическую сортировку отходов с переработкой вторичного сырья, применение биотехнологических методов (предварительной механобиологической обработки и компостирования), депонирование на полигонах ТБО.

Следует отметить, что даже при использовании современных технологических систем переработки отходов, применяемых в развитых странах Европы и США, не исключается размещение отходов в окружающей среде на полигонах ТБО.

Воздействие полигона ТБО на окружающую среду обусловлено образующимися при деструкции отходов газовыми выбросами – биогазом, основными компонентами которо-

го являются метан и углекислый газ, и фильтрационными водами (ФВ), образующимися за счет влажности отходов, инфильтрации атмосферных осадков, биохимических процессов, сопровождающихся образованием воды, которые характеризуются высоким содержанием токсичных органических и неорганических веществ. Обеспечение требуемого санитарного состояния полигонов ТБО предусматривает использование эффективных технологий обезвреживания фильтрационных вод и дегазации объектов.

Для управления потоками эмиссий на полигонах ТБО при проектировании новых объектов необходимо прогнозировать количественные и качественные изменения их состава. Длительность процессов разложения отходов не позволяет получить достоверных экспериментальных результатов по составу эмиссий и в этом случае моделирование является более надежным инструментом прогнозирования эмиссионного потенциала отходов.

В работах [1, 2] авторами на основании анализа морфологического состава отходов и процессов биодеструкции каждой фракции ТБО была разработана модель биодеструкции отходов на полигонах ТБО, где депонировались несортированные отходы.

Отходы в зависимости от процессов, лежащих в основе их разложения, подразделяют на следующие виды:

- биodeградируемые фракции ТБО, к которым относятся пищевые, садово-парковые отходы, бумага, древесина, некоторые виды текстиля;

- фракции ТБО, подвергающиеся химической и фотохимической деструкции – черные и цветные металлы, пластмассы;

- балластные – камни, стекло, строительные материалы.

Химический и микробиологический состав эмиссий зависит от механизмов, скорости и полноты протекания химической и биохимической деструкции каждой фракции ТБО и этапа жизненного цикла полигона. Превалирующую роль при разложении отходов играют биохимические процессы, протекающие в анаэробных условиях [3–6]. Анаэробному разложению подвергаются в основном целлюлозосодержащие отходы (бумага, садово-парковые отходы, дерево, ткань) [3, 4]. В работах Barlaz и было установлено, что именно при анаэробной деструкции целлюлозы и гемицеллюлозы формируется 91% метанового потенциала большинства отходов [4].

При разработке биохимической модели деструкции ТБО были использованы следующие допущения:

1. Целлюлозосодержащие отходы ($C_6H_{10}O_5$)_n в биохимических превращениях были представлены в виде твердой глюкозы – $nC_6H_{12}O_6$.

2. Полагалось, что основными продуктами разложения целлюлозосодержащих отходов являются летучие жирные кислоты, разла-

гающиеся до уксусной кислоты, углекислого газа, водорода и воды. На стадии стабильного метаногенеза биоразложению подвергается наиболее трудно разлагаемый лигнин – $C_9H_{10}O_4$, содержание которого в целлюлозосодержащих отходах составляет 20–25%.

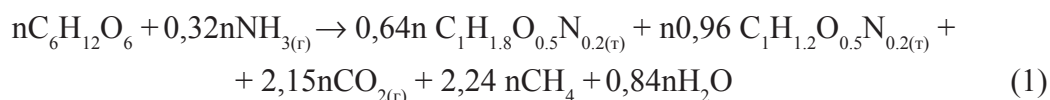
3. Химический состав формирующейся в анаэробных условиях биомассы выражен следующей формулой $C_1H_{1,8}O_{0,5}N_{0,2}$ [6].

4. Химический анализ формирующегося свалочного грунта (СГ) и природы гуминовых веществ, их свойств позволил смоделировать основной фрагмент свалочного грунта, формирующегося в течение 20–25 лет, и установить его структурную формулу, на основании которой была определена брутто-формула органической фракции свалочного грунта: $C_1H_{1,2}O_{0,5}N_{0,2}$.

При описании процессов анаэробной биодеструкции отходов на полигонах ТБО выделялись следующие основные фазы: гидролиз, ацетогенез, активный метаногенез, стабильная фаза метаногенеза и полная ассимиляция, которые совпадают с основными этапами жизненного цикла полигона: активной эксплуатации, рекультивации и ассимиляции [4, 5]. Несмотря на то, что при биодеструкции ТБО протекают сложные биохимические процессы с образованием ряда органических соединений, из всего многообразия реакций при разработке модели были выделены основные: анаэробное разложение целлюлозосодержащих отходов, сопровождающееся образованием летучих кислот жирного ряда, биогаза, свалочного грунта, содержащего твердые органические соединения гумусовой природы, и ростом биомассы (анаэробных бактерий).

Модель биодеструкции целлюлозосодержащих фракций ТБО на стадии активного и стабильного метаногенеза представлена следующими уравнениями:

Активный метаногенез:



Стабильный метаногенез:

а) биодеструкция лигнина:



б) биодеструкция неразложившейся части целлюлозы протекает по уравнению (1).

В настоящей работе представлены результаты моделирования эмиссионного потенциала ТБО после их предварительной подготовки путем ручной и/или оптико-механической сортировки с утилизацией вторичного сырья, механико-биологическая стабилизация биodeгради-

руемых фракций ТБО с последующим захоронением стабилизированных отходов на полигоне ТБО.

При моделировании эмиссионных потоков ТБО использовали результаты натурных исследований морфологического состава отходов действующего полигона ТБО г. Перми, проведенных в 2009–2012 гг, а также состава потоков отходов, образу-

ющихся при работе мусоросортировочной линии ручной и оптико-механической сортировки [7]. На основании полученных данных определены коэффициенты трансформации (коэффициент извлечения вторичного сырья) каждой фракции отходов и рассчитан морфологический состав отходов после ручной ТБО-РС и оптико-механической сортировки ТБО-ОМС, представленный в табл. 1. Следует отметить, что за последние десять лет в ТБО значительно увеличилось содержание полимерных отходов (15,2%). Высокое содержание полимерных отходов, их неупорядоченное складирование совместно с другими фракциями препятствует процессам деструкции био-разлагаемых фракций ТБО. Предварительная сортировка ТБО позволяет выделить из них целевые фракции (металл, макулатуру, полимеры), использовать их ресурсный потенциал и сократить объем депонированных отходов.

Установлено, что при ручной сортировке масса отходов сокращается на 15,7%, при оптико-механической – на 26,9% в результате выделения части макулатуры, полимерной тары и металлов. Характеристика химического состава и некоторых физико-химических свойств биodeградируемых фракций ТБО представлены в табл. 2.

В представленном морфологическом составе ТБО г. Перми биodeградируемая фракция составляет 40,0% (без учета мелкой фракции), являющихся основным источником эмиссий на полигоне. Установлено, что в результате извлечения вторичного сырья доля биodeградируемой фракции в депонируемых отходах после ручной сортировки (ТБО-РС) несколько увеличивается и составляет 42,86%, после оптико-механической сортировки (ТБО-ОМС) – 37,7%, при этом в ней увеличивается содержание легко разлагаемых составляющих – пищевых отходов. Отсев сортировки целесообразно подвергать аэробной стабилизации (АС), заключающейся в интенсивной аэрации отходов, например, в биобарабанах, при температуре 30–50°C, влажности 45–50%, скорости подачи воздуха 40–60 м³/(ч·т) в течение 10–12 часов и с последующей обработкой в штабелях на открытых площадках в течение 10–12 недель. При этом происходит интенсивная ферментация отходов под действием термофильных аэробных микроорганизмов с формированием гумусовых соединений, сопровождающаяся снижением массы отходов в 2–2,2 раза.

Таблица 1

Морфологический состав ТБО до и после ручной и оптико-механической сортировки

Категория	Подкатегория	Содержание, % по массе, ТБО	K _T РС	Содержание, % по массе, ТБО-РС	K _T ОПС	Содержание, % по массе, ТБО-ОМС
Органические отходы	Пищевые отходы	7,09	0,00	8,44	0,00	10,0
	Растительные отходы	1,9	0,00	2,28	0,00	2,66
Макулатура	Картон	8,6	0,37	6,45	0,26	3,12
	Бумага	10,5	0,06	11,76	0,37	5,28
	Прочая макулатура	3,7	0,00	4,22	0,00	5,17
Полимеры	Пленка	5,7	0,23	5,22	0,40	4,80
	Бутылка	4,0	0,48	2,47	1,00	0,00
	Прочая упаковка	2,3	0,26	2,02	0,8	2,57
	Прочие полимеры	2,2	0	2,49	0,00	3,10
Стекло	Стеклотара	17,7	0,38	13,06	0,38	15,33
	Прочее стекло	0,0	0,40	0	0,00	0,00
Металлы	Черные металлы	2,2	0,43	1,50	0,63	0,83
	Цветные металлы	0,5	0,52	0,29	0,63	0,02
Текстиль	Текстиль	5,0	0,01	5,90	0,00	7,00
Дерево	Дерево	1,3	0,00	1,55	0,00	1,81
Комбинированные материалы	Комбинированная упаковка	1,0	0,00	1,19	0,00	1,41
	Электронные отходы	0,8	0,04	0,91	0,00	1,11
Опасные отходы	Опасные отходы	0,3	0,00	0,36	0,00	0,42
Инертные материалы	Строительные отходы	1,2	0,00	1,43	0,00	1,70
	Прочие инертные материалы	0,2	0,00	0,02	0,00	0,30
Прочее	Подгузники	1,9	0,00	2,26	0,00	2,66
	Кожа, резина, обувь	2,0	0,00	2,38	0,00	2,81
	Прочее	7,6	0	9,04	0,00	10,62
Мелкая фракция	Мелкая фракция	12,4	0	14,76	0,00	17,31
ИТОГО	ИТОГО	100,0		100,0		100,0

Таблица 2
Химические и физико-химические свойства биodeградируемых фракций ТБО

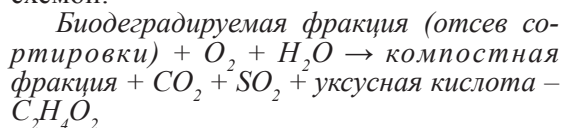
Фракция отходов	Химический состав фракции (в расчете на сухие ТБО)	Молярная масса, кг/кмоль	Период полураспада*, лет	Содержание, кг/т			Содержание С кг/т		
				ТБО	ТБО-РС	ТБО-ОМС	ТБО	ТБО-РС	ТБО-ОМС
Пищевые отходы	$C_{320}H_{571}O_{188}N_{15}S$	7661	1	71,0	84,4	100	35,59	42,3	50,12
Растительные отходы	$C_{425}H_{636}O_{254}N_{6,4}S$	9921,6	15	19,0	22,8	26,6	9,77	11,72	13,67
Картон Бумага Прочие	$C_{581}H_{952}O_{441}N_{3,4}S$	15059,6	25 7 15	86,0 105,0 37,0	64,5 117,6 42,2	31,2 52,8 51,7	105,25	103,84	62,82
Дерево	$C_{1321}H_{1904}O_{856}N_{4,6}S$	31548,4	25	13,0	15,5	18,1	6,53	7,79	9,095
Ткань, текстиль, подгузники	$C_{979}H_{1396}O_{417}N_{70}S$	20828	15	69,0	81,6	96,6	38,92	46,026	54,49
Биodeградируемая фракция	$C_{613}H_{1325}O_{394}N_{17}S$ – ТБО** $C_{621}H_{975}O_{389}N_{18,5}S$ – ТБО – РС $C_{653}H_{1014}O_{347}N_{23,4}S$ – ТБО – ОМС или $C_{10}H_{15,8}O_{5,3}N_{0,36}S_{0,015}$	13110	7-20	400	428,6	377,0	196,06	211,68	109,195

Примечания: * – период полураспада фракций представлен для средней влажности отходов – 30–60% [5];

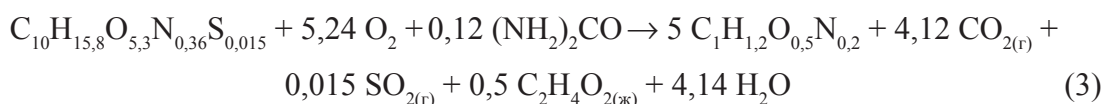
** – брутто-формула биodeградируемой фракции отходов определена с учетом химического и количественного состава каждой фракции.

После 3–4 месяцев, необходимых для полного созревания и формирования компоста, стабилизированные отходы (ТБО-АС) могут быть складированы на полигоне или использованы в качестве грунта, используемого для пересыпки отходов или рекультивации закрытых для приема отходов карт.

Процесс аэробной стабилизации отходов может быть отражен следующей схемой:



Модель аэробной стабилизации ТБО-ОМС:



На основе разработанной биохимической модели биодеструкции отходов проведены расчеты эмиссионного потенциала отходов и формирования твердой фазы при различных способах их предварительной подготовки: несортированные отходы – ТБО, ТБО-РС, ТБО-ОМС, результаты которых представлены в табл. 3.

Рассчитанные эмиссии биогаза коррелируют с литературными данными [6].

Анализ полученных данных показал, что внедрение оптико-механической сортировки на полигоне позволит не только значительно снизить объем депонированных отходов, увеличить полезную площадь захоронения, но и снизить объем эмиссий в 1,5 раза. При депонировании сортирован-

ных отходов необходимо учитывать возможность значительной интенсификации процессов деструкции и соответственно значительного сокращения жизненного цикла полигона ТБО.

Используя модель аэробной стабилизации биodeградируемой фракции ТБО-ОМС, рассчитано, что при обработке 1 т ТБО-ОМС образуется 178 кг компоста, при этом будет выделяться 270,1 кг CO₂ (137,5 м³) и 1,43 кг SO₂ (0,5 м³).

Установлено, что оптико-механическая сортировка отходов с последующей аэробной стабилизацией биodeградируемой фракции отсева позволит снизить объемы депонируемых отходов на 58–60% и предотвратить выделение метана при деструкции.

Таблица 3

Результаты расчета эмиссий биогаза на различных стадиях деструкции ТБО
(расчеты проводились на 1 т ТБО)

Стадия деструкции	Масса эмиссий и формирующейся биомассы и свалочного грунта,			Примечание
	CH ₄	CO ₂	СГ и биомасса	
ТБО				
Активный метаногенез, кг/т сух. ТБО	68,77	181,51	74,41	Неразложившаяся часть ТБО на стадии активного метаногенеза, кг, в том числе: глюкоза (ТВ.) – 74,02 кг лигнин – 82,25 кг
Стабильный метаногенез, кг/т сух. ТБО, разложение лигнина, оставшейся целлюлозы	14,4 29,47	39,6 77,79	54,24 31,9	
Итого , кг/т сух. ТБО нм ³ /т сух. ТБО	112,64 157,7	298,9 152,17	160,55 -	
ТБО-РС				
Активный метаногенез	72	190,05	77,92	Неразложившаяся часть ТБО на стадии активного метаногенеза, кг, в том числе: глюкоза (ТВ.) – 77,5 кг лигнин – 85,54 кг
Стабильный метаногенез: разложение лигнина, оставшейся целлюлозы	15,04 30,86	45,76 81,45	56,4 31,38	
Итого , кг/т сух. ТБО нм ³ /т сух. ТБО	117,9 165,06	317,26 161,51	165,7 -	
ТБО-ОМС				
Активный метаногенез	57,9	81,45	53,07	Неразложившаяся часть ТБО на стадии активного метаногенеза, кг, в том числе: глюкоза (ТВ.) – 62,32 кг лигнин – 69,16 кг
Стабильный метаногенез: разложение лигнина, оставшейся целлюлозы	12,16 16,64	27,1 65,20	45,6 25,24	
Итого , кг/т сух. ТБО нм ³ /т сух. ТБО	86,7 121,38	173,75 88,45	123,91 -	

Выводы

1. На основании разработанной биохимической модели деструкции ТБО рассчитаны эмиссионные потенциалы несортированных отходов и отходов после ручной и оптико-механической сортировки на различных стадиях метаногенеза и установлено влияние способа претритмента на формирование эмиссий.

2. Разработана биохимическая модель процесса аэробной стабилизации биодеградируемой фракции отходов и рассчитаны формирующиеся материальные потоки при аэробной обработке отсева оптико-механической сортировки.

3. Предварительная оптико-механическая сортировка отходов с последующей аэробной стабилизацией биодеградируемой фракции позволит снизить объемы депонируемых отходов на 58–60% и предотвратить выделение метана при деструкции.

4. Разработанные подходы к расчету эмиссионного потенциала ТБО при различных способах их предварительной подготовки могут быть использованы при проектировании санитарных полигонов ТБО

и выборе эффективных технологий дегазации полигона и утилизации биогаза.

Список литературы

1. Вайсман Я.И., Коротаяев В.Н., Глушанкова И.С. Управление отходами. Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твердых бытовых отходов: монография. – Пермь: Из-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 259 с.
2. Глушанкова И.С., Зайцева Т.А., Рудакова Л.В. Управление полигонами ТБО на основе биотехнологических принципов // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 35–39.
3. Micales J.A., Skog K.E. The Decomposition of Forest Products in Landfills // International Biodeterioration & Biodegradation. – 1997. – Vol. 39. – № 2–3. – P. 145–158.
4. McDougal J.R., Pyrah L.C. Moisture effects in a biodegradation model for waste refuse // 7 International waste management and landfill symposium. – Sardinia, 1999. – Vol. I. – P. 59–66.
5. Barlaz M., Camobreco V. Life – cycle inventory of modern municipal solid waste landfill / Environmental impact, aftercare and remediation of landfills. Vol. II // 7 International waste management and landfill symposium. – Sardinia, 1999.
6. Barlaz M., Ham R. Mass balance analysis of anaerobically decomposed refuse // J. Environ. Eng. – ASCE 115(6), 1989. – P. 1088–1102.
7. Ильиных Г.В., Слюсарь Н.Н., Базылева Я.В., Матвеев Ю.Б., Пухнок А.Ю. Управление метановым потенциалом твердых бытовых отходов путем их предварительной обработки.

References

1. Vaysman Ya.I., Korotaev V.N., Glushankova I.S. Upravlenie othodami. Stokhnyie vodyi i biogaz poligonov zahoroneniya tverdyih byitovyih othodov: monografiya. Perm: Iz-vo Perm. nats.issled.politehn.un-ta,2012. 259 p.

2. Glushankova I.S., Zaytseva T.A., Rudakova L.V. Upravlenie poligonami TBO na osnove biotehnologicheskikh printsipov // Ekologiya i promyshlennost Rossii, 2011, no. 5, p. 35–39.

3. Micales J.A., Skog K.E. The Decomposition of Forest Products in Landfills // International Biodeterioration & Biodegradation Vol. 39, no. 2–3 (1997) pp. 145–158.

4. McDougal J.R., Pyrah L.C. Moisture effects in a biodegradation model for wast refuse / 7 International wast management and landfill simposium. Sardinia,1999. Vol I, pp. 59–66.

5. Barlaz M., Camobreco V. Life – cycle inventory of modern municipal solid waste landfill / Environmental impact, after-care and remediation of landfills. Vol. II // 7 International waste management and landfill symposium. Sardinia, 1999.

6. Barlaz M., Ham R. Mass balance analysis of anaerobically decomposed refuse // J. Environ. Eng., ASCE 115(6),1989, pp. 1088–1102.

7. Ilinyih G.V., Slyusar N.N., Bazyileva Ya.V., Matveev Yu.B., Puhnyuk A.Yu. Upravlenie metanovyim potentsialom tverdyih byitovyih othodov putem ih predvaritel'noy obrabotki.

Рецензенты:

Уланова Т.С., д.б.н., профессор, зав. лабораторией физико-химического анализа, ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», г. Пермь;
Халтурин В.Г., д.т.н., профессор кафедры охраны окружающей среды, ФГОУ «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь.
Работа поступила в редакцию 06.03.2014.