

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ИЗ МЕСТ ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

В.Ю. Приходько, Т.А. Сафранов, Т.П. Шанина*

Одесский государственный экологический университет,
Украина, 65016, г. Одесса, ул. Львовская, 15; *vks26@ua.fm

Резюме. Поскольку основным методом обращения с твердыми бытовыми отходами является (и остаётся в перспективе) захоронение на свалках и полигонах, то актуальными являются вопросы оценки воздействия таких объектов на окружающую среду. Одним из таких исследовательских направлений является оценка эмиссии парниковых газов. В статье рассматриваются наиболее используемые модели (методики) определения эмиссии парниковых газов из мест захоронения твердых бытовых отходов – IPCC и LandGEM модели, а также Национальная модель газообразования (Украина). Сравнительный анализ моделей позволил определить их преимущества, недостатки, а также возможности взаимной замены параметров моделей. Модели могут быть использованы как для определенного места захоронения отходов, так и для территорий различного уровня организации. К параметрам, которые уточняются в зависимости от объекта исследования, относятся: морфологический состав твердых бытовых отходов, климатические условия и особенности мест захоронения. Для повышения точности расчетов рекомендуется учитывать максимальное количество компонентов бытовых отходов (7 компонентов), которые являются источником биодоступного углерода. Скорость разложения отдельных компонентов отходов наиболее точно отображается в разработанных наборах значений параметра k из адаптированного к украинским условиям варианта модели LandGEM. Аппроксимацию значений параметра на региональный и национальный уровень рекомендуется проводить на основе климатического районирования территории. Параметры моделей, которые рассматриваются в статье, как правило, взаимозаменяемы и могут быть уточнены до уровня конкретного полигона. В работе показаны возможности синтеза отдельных переменных для использования их в региональных условиях, например, для Одесской области (Украина).

Ключевые слова. Твердые бытовые отходы, свалки и полигоны, парниковые газы, эмиссия, модель.

ESTIMATION OF GREENHOUSE GASES EMISSION FROM SITES OF MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL

V.Yu. Prykhodko, T.A. Safranov, T.P. Shanina*

Odessa State Ecological University,
15, Lvovskaya str., 65016, Odessa, Ukraine; *vks26@ua.fm

Abstract. Since the main waste treatment method is (and will continue in perspective) disposal on dumps and landfills, so estimation of such places pressure on

environment is actual. One of such research directions is estimation of greenhouse gases emission. The most used models (methodologies) of estimation of greenhouse gases emission from municipal solid waste disposal sites are considered in the paper – IPCC and LandGEM models, and National model of gas generation (Ukraine). Comparative analysis of models allows identifying their advantages, disadvantages and the possibility of mutual replacing of models parameters. The models can be used both for particular place of waste disposal and for territories of different organization level. Parameters, which are specified depending of research object, are the municipal solid waste composition, climate conditions and disposal places patterns. For increase in accuracy of calculations we recommend to consider the maximum quantity of municipal solid waste components (7 components), which are a source of biodegradable carbon. The rate of separate waste components decay is the most precisely displayed in the developed sets of k parameter values from the Ukraine LFG Model, adapted to national conditions. Approximation of parameter values on regional and national levels is recommended to do on the basis of climatic zoning of the territory. Parameters of models considered in article, as a rule, are interchanged and can be specified to the level of the particular landfill. The possibilities of separate parameters synthesis for their use in regional conditions, for example, in the Odessa region (Ukraine) are shown.

Keywords. Municipal solid waste, dumps and landfills, greenhouse gases, emission, model.

Введение

Проблема загрязнения окружающей природной среды (ОПС) отходами и продуктами их деструкции является одной из наиболее актуальных. Основным методом обращения с твёрдыми бытовыми отходами (ТБО) на сегодня является их захоронение на полигонах и свалках. По данным Доклада «Что с отходами: глобальный обзор управления твердыми отходами» (далее – Доклад) (What a Waste..., 2012), более половины образующихся отходов размещается на свалках и полигонах мира. В результате этого возникает проблема вторичного загрязнения ОПС компонентами отходов и продуктами их деструкции, а захороненные компоненты ТБО навсегда утрачивают свою ресурсную ценность. Экологические проблемы, возникающие вследствие неэффективного обращения с ТБО, усугубляются неуклонным ростом количества образующихся отходов и инертностью общества в осознании проблемы и реакции на неё. Согласно Докладу (What a Waste..., 2012), к 2025 г. в мире ожидается удвоение количества образующихся ТБО относительно показателей 2012 г. Также, по оценкам авторов Доклада, к 2100 г. ожидается утроение количества образующихся ТБО на уровне 11 млн. т в день. Показано, что удельное количество образующихся отходов также будет расти, а реакция стран-участниц Организации экономического сотрудничества и развития на проблему отходов позволит в перспективе (к 2050 г.) снизить удельное отходообразование лишь на 5% (What a Waste..., 2012). Всё это обуславливает то, что «мусорный кризис», пока ещё не вполне осознанный обществом, является существенным фактором неустойчивого сосуществования антропосферы и ОПС, причиной ее загрязнения.

Воздействие мест захоронения ТБО на атмосферный воздух заключается в выделении биогаза вследствие анаэробной биодеструкции органической части отходов. Основными составляющими биогаза являются метан и углекислый газ – парниковые газы (ПГ), антропогенная эмиссия которых (из различных антропогенных источников) рассматривается как основной фактор климатических изменений планетарного масштаба. Свалки и полигоны ТБО являются третьим по величине антропогенным источником метана и обеспечивают 11% от общего его количества, поступившего из антропогенных источников в 2010 г. (Лучшие методы..., 2012). В Украине на долю сектора «Отходы» в 2013 г. приходилось 15.3% от общего количества метана (в 1990 г. – 5.5%), из них 64% приходится на захоронение ТБО. Из всех представленных в Национальном Кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ в Украине за 1990-2013 гг. (далее – Кадастр), сектор «Отходы» – единственный, для которого характерна положительная динамика эмиссии метана: за период 1990-2013 гг. выбросы выросли на 23.66% (Национальный Кадастр..., 2015).

В связи с этим актуальными являются исследования по оценке эмиссии биогаза и/или его компонентов, которые, с одной стороны, являются ПГ, а с другой стороны – это альтернативный источник энергии, использование которого позволит частично заменить первичное сырье для энергетического сектора и, в то же время, уменьшить поступление ПГ в атмосферу. Целью данной работы является критический анализ наиболее распространённых методик оценки эмиссии ПГ из мест захоронения ТБО и возможностей их использования на региональном уровне (на примере Одесской области, Украина). Отметим, что разработанные в настоящее время методики оценки эмиссии ПГ применяются для условий отдельных полигонов ТБО и стран (национальный уровень). Тогда как актуальным остаётся вопрос оценки биогазового потенциала регионов для более эффективного управления отходами и снижения техногенной нагрузки на ОПС.

Методы и материалы

Для количественной оценки перехода углерода, содержащегося в отходах, в метан, используют метод массового баланса и метод затухания (разложения) первого порядка, в основу которых положена одна модель – анаэробной деструкции органического вещества с образованием соответствующих продуктов разложения. На основе метода затухания первого порядка разработаны две наиболее используемые методики (в авторском наименовании – модели):

1) модель IPCC, предложенная Межправительственной группой экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change) (МГЭИК, IPCC) (Руководящие принципы..., 2006);

2) модель LandGEM (Landfill Emission Gas Model – LandGEM), разработанная Агентством по охране окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency – U.S. EPA) (Landfill Gas..., 2005).

Существуют модифицированные варианты данных моделей. Например, в Украине оценка эмиссии метана из мест захоронения ТБО (при составлении

Национального Кадастра) проводится по Национальной многокомпонентной модели на основе метода затухания первого порядка третьего уровня детализации (далее – Национальная модель), которая разработана в Институте технической теплофизики Национальной Академии Наук Украины (Национальный Кадастр..., 2015). В основу Национальной модели положена модель IPCC и результаты теоретических и экспериментальных исследований коллективов института-разработчика, Научно-технического центра (НТЦ) «Биомасса» и Национального центра учета выбросов парниковых газов (Ю.Б. Матвеева, А.Ю. Пухнюка, С.Л. Шмарина и др.; основные работы приведены в Списке литературы). В одной из работ (Шмарин и др., 2014б) использованы результаты исследований по адаптации модели LandGEM к украинским условиям (Ukraine LFG Model), которая также используется самостоятельно. Разработка адаптированной к украинским условиям версии модели LandGEM проводилась в рамках программы U.S. EPA's Landfill Methane Outreach Program, это одна из так называемых LMOP's Models (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009). Ниже приведены основные положения и расчетные формулы методик в авторской редакции.

Модель IPCC. Количество метана $Q(T)$, который образуется за год T , рассчитывается по формуле (1).

$$Q(T) = DDOC_{mT} \cdot F \cdot 16/12, \quad (1)$$

где F – доля метана в общей массе образовавшегося биогаза; $DDOC_m$ – общая масса биологически разложившегося за год T углерода, т, которая находится из уравнения (2)

$$DDOC_{mT} = DDOC_{mdT} + DDOC_{ma_{T-1}} (1 - e^{-k}) \quad (2)$$

где $DDOC_{ma_{T-1}}$ – масса углерода, накопленного к концу года $(T-1)$, т; $DDOC_{mdT}$ – масса углерода, удаленного на свалки и полигоны за период T , т; k – константа разложения, год⁻¹.

Масса углерода в отходах, способного к биоразложению, находится из уравнения (3)

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF, \quad (3)$$

где W – общая масса отходов, размещенных на свалке или полигоне, т; DOC – способный к разложению органический углерод в год удаления T , тСН₄ тТБО⁻¹; DOC_f – часть углерода, которая принимает участие в реакциях распада; MCF – поправочный коэффициент для метана (Руководящие принципы..., 2006).

Эмиссия метана из мест захоронения отходов ($Q(T)^{em}$) рассчитывается следующим образом:

$$Q(T)^{em} = [Q(T) - R_T] \times (1 - OX_T), \quad (4)$$

где R_T – масса собранного (рекуперированного) метана, т; OX_T – фактор окисления метана.

Для удобства расчетов эмиссии метана по IPCC модели разработан инструмент на основе электронных таблиц MS Excel – IPCC Waste Model.xls, который позволяет осуществлять различные варианты расчетов эмиссии метана в результате разложения определённых компонентов ТБО и даже части промышленных отходов.

Модель LandGEM. Модель для расчета эмиссии метана LandGEM, разработанная Агентством по защите окружающей среды США, также основывается на уравнении разложения (затухания) первого порядка. Так, эмиссия метана от мест захоронения ТБО Q_{CH_4} описывается таким уравнением:

$$Q_{CH_4} = \sum_{x=1}^n \sum_{y=0,1}^1 k \cdot L_0 \left(\frac{M_x}{10} \right) e^{-kt_{xy}}, \quad (5)$$

где n – разница между расчетным годом и годом начала захоронения ТБО; x и y – временные шаги, равные 1 и 0.1 года соответственно; k – коэффициент генерации метана, год⁻¹; L_0 – потенциал образования метана, тСН₄ тТБО⁻¹; M_x – масса ТБО, захороненных в год x , т год⁻¹; t_{xy} – возраст y -ой части массы отходов, захороненной в год x (Landfill Gas..., 2005).

Уравнение (6) для расчета эмиссии биогаза (Q_{LFG}), адаптированное для Украины (Ukraine LFG Model), выглядит следующим образом:

$$Q_{LFG} = \sum_{x=1}^n \sum_{y=0,1}^1 2k \cdot L_0 \left(\frac{M_x}{10} \right) e^{-kt_{xy}} \cdot MCF \cdot F_g, \quad (6)$$

где MCF – поправочный коэффициент метанообразования; F_g – поправочный коэффициент для возгорания, зависит от площади и полноты выгорания ТБО на свалке, пропорционально чему уменьшается эмиссия биогаза (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009).

Для модели LandGEM также разработан инструмент, позволяющий проводить расчеты и создавать графический материал на основе электронных таблиц MS Excel – LandGEM Version 3.02. Также есть электронные таблицы в MS Excel и для модифицированного варианта – Ukraine LFG Model.

Национальная модель. Образование метана при захоронении ТБО, выведенных за текущий и предыдущие годы, рассчитывается как

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A \cdot k_j \cdot MWS_i \cdot MWS_{i,j} \cdot L_{0ij} \cdot e^{-k_j \cdot (t-x)}, \quad (7)$$

где A – нормализующий множитель, который определяется по формуле (8)

$$A = (1 - e^{-k_j}) / k_j, \quad (8)$$

где k_j – постоянная темпов образования метана для j -го компонента ТБО, год⁻¹ (табл. 1); MWS_i – общая масса ТБО, захороненных в год i , т год⁻¹; $MWS_{j,i}$ – содержание j -го компонента в ТБО в i -м году; t – расчётный год; x – период, за который вносятся данные, год; m – количество j -х компонентов ТБО, содержащих биоразлагаемый углерод; n – количество лет, за которое рассчитывается генерация метана; $L_{0i,j}$ – потенциал образования метана в год i , тСН₄ тТБО⁻¹:

$$L_{0i,j} = DOC_j \cdot DOC_F \cdot F \cdot 16/12 \cdot MCF_i, \quad (9)$$

где DOC_j – общее количество органического углерода, способного биологически разлагаться, в j -ой фракции, тС тТБО⁻¹; DOC_F – часть углерода, которая принимает участие в реакциях распада ($DOC_F = 0.5$); F – содержание метана в биогазе ($F = 0.5$); $16/12$ – коэффициент пересчёта углерода в метан; MCF_i – фактор коррекции образования метана, зависящий от условий захоронения ТБО (табл. 2).

Эмиссия метана также рассчитывается по формуле (4).

Таблица 1. Значения параметра k_j на разных уровнях детализации

№	Компонент	k_j , год ⁻¹			
		IPCC модель	Ukraine LFG Model	Национальная модель	
				национальный уровень	региональный уровень ****
I	Бумага и картон	0.06	0.027	0.048	0.024
II	Текстиль				
III	Пищевые отходы	0.185	0.135	0.110	0.120
IV	Древесина	0.03	0.0135	0.024	0.012
V	Садово-парковые отходы	0.1	0.068	0.07	0.06
VI	Средства личной гигиены	0.1	–	0.048	0.120
VII	Кожа, резина	–	0.0135	0.048	0.012
Среднее значение для Украины		0.1296	0.0948	0.0829**	–
		0.1127*	0.0879**	0.0875***	
Среднее значение для Одесской области		–	0.0749	–	0.0758

Примечания: * рассчитано по данным о морфологическом составе ТБО стран Восточной Европы (Руководящие принципы..., 2006);

** рассчитано по данным о морфологическом составе ТБО Украины из работы (Шмарин и др., 2014а);

*** рассчитано по данным о морфологическом составе ТБО Украины из работы (Исследование газообразования..., 2012);

**** по данным из работы (Шмарин и др., 2014б)

Таблица 2. Значения показателя MCF_i (Руководящие принципы..., 2006)

Типы полигонов и свалок	MCF_i
Управляемые анаэробные	1.0
Управляемые полуанаэробные	0.5
Неуправляемые глубокие	0.8
Неуправляемые неглубокие	0.4
Неклассифицированные	0.6
Среднее значение для Украины, начиная с 2008 (Национальный Кадастр..., 2015)	0.726

Сравнительный анализ моделей. Несмотря на общность процессов, положенных в основу моделей, провести сравнительный анализ математического аппарата моделей в оригинальном виде достаточно сложно. Например, Национальная и LandGEM модели оперируют величиной L_0 – потенциал образования метана (правда, в разных единицах измерения), тогда как модель IPCC (в версии 2006 г.) такую величину в явном виде не использует, хотя в (Руководящие принципы..., 2006) приводится уравнение для L_0 . Отметим, что в модели LandGEM (в т.ч. и в адаптированном варианте) параметр k используется в качестве множителя, тогда как в других моделях он используется как показатель степени. Кроме того, в данной модели значения параметров k и L_0 не зависят от морфологического состава ТБО, а для всей массы отходов принимаются одинаковые значения данных параметров.

Достаточно полный сравнительный анализ моделей IPCC и LandGEM представлен в отдельных работах – (Лучшие методы..., 2012; Волынкина, Домнин, 2014). Исследования по использованию моделей на региональном уровне практически отсутствуют. Сравним данные модели с Национальной моделью и рассмотрим возможности применения на региональном уровне.

Как известно, деструкция биоразлагаемых компонентов ТБО в местах их захоронения на протяжении длительного времени (50-80 лет) приводит к образованию соответствующего продукта – биогаза, который состоит из метана (40-60%), углекислого газа (30-45%) и других газов (5-10%) (ДБН..., 2005). К компонентам биогаза, которые являются ПГ, относятся: метан, углекислый газ, неметановые летучие органические соединения (НЛОС) и закись азота. Модель IPCC позволяет рассчитать выделение только метана. Углекислый газ как продукт биоразложения отходов в местах захоронения ТБО рассматривается в секторе «Сельское хозяйство...». Закись азота, ввиду малых количеств, не рассчитывается (Руководящие принципы..., 2006). Национальная модель также позволяет рассчитать эмиссию только метана. В отличие от них, модель LandGEM позволяет проводить расчет эмиссии не только метана, но и диоксида углерода и НЛОС, в т.ч. по конкретным веществам. Величина эмиссии диоксида углерода и НЛОС зависит от результатов расчёта эмиссии метана по уравнению (5) (Landfill Gas..., 2005).

Учет морфологического состава захороненных ТБО в рассматриваемых моделях осуществляется как непосредственно (показатель $MWS_{j,i}$), так и при помощи константы k_j , которая, хотя и имеет разное название, отражает скорость разложения отходов и продуцирования метана. Основным источником биодоступного углерода для образования метана являются следующие компоненты ТБО: бумага и картон, пищевые и садово-парковые отходы, древесина, текстиль, а также кожа, резина и средства личной гигиены, выделенные в качестве отдельных компонентов сравнительно недавно. Их предлагается учитывать в Руководящих принципах (2006), тогда как в Руководящих принципах (2000) выделялись только четыре компонента, а бумага и текстиль объединялись в одну категорию, хотя значения DOC_j для данных категорий различны. k_j определяется покомпонентно и зависит от таких факторов, как влажность, рН отходов, содержание биогенных элементов и температура (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009; Руководящие принципы..., 2006), а практически привязан к климатическим особенностям территории захоронения ТБО (табл. 1). Как исключение, в модели LandGEM значения параметра k можно принимать по умолчанию или выбрать, в зависимости от типа полигона, для засушливых или нормальных условий. Также можно использовать специфические для места захоронения ТБО значения параметра k . Их можно получить, например, из адаптированного варианта модели (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009), где приведены значения параметра k в зависимости от категории отходов (выделено 4 категории в зависимости от скорости разложения) и климатических условий территории (для Украины выделено 4 типа территорий). Допускается использовать значения k из IPCC модели. В адаптированном варианте модели LandGEM территория Украины делится на 4 климатических региона в зависимости от среднесуточной температуры и суммы осадков за год (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009). При этом районирование территории Украины по климатическим показателям осуществлялось на основе административно-территориального районирования. Например, Одесская область характеризуется значимыми климатическими различиями северной и южной части, однако для всей территории присваивается единый набор значений параметра k , и это можно отнести к недостаткам модели.

Безусловно, что для получения более точных результатов расчета эмиссии метана на региональном уровне следует использовать значения параметра k , которые максимально полно соответствуют условиям его образования – климатическим особенностям и морфологическому составу ТБО в местах захоронения. Кроме того, использование более точных региональных данных обеспечивает более точные результаты на национальном уровне. Это подтверждают результаты, приведенные в табл. 1. Средние значения параметра k для общей массы биоразлагаемых компонентов в составе ТБО, приведенные в табл. 1, получены методом средневзвешенного, используя такие данные: значения частных коэффициентов k ; морфологический состав ТБО на разных уровнях детализации и из различных источников данных; площади областей Украины.

Значения параметра k различаются в зависимости от вида отходов и климатических особенностей места захоронения, а также от выбранной методики. Как видно из результатов в табл. 1, использование различных исходных данных для получения среднего значения параметра k влияет на результат. Модель IPCC позволяет оперировать значениями параметра k без региональных различий для территории Украины. Однако использование, например, данных о морфологическом составе ТБО Украины позволяет получить большее значение параметра k (0.1296), чем при использовании данных по странам Восточной Европы (0.1127).

Для модели LandGEM нами рассчитаны средние значения параметра k для 4 категорий отходов, которые перенесены на 6 компонентов ТБО (табл. 1) с учетом площади регионов, которым присваиваются определенные значения k из исследования (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009). Средние значения параметра k для территории Украины получены по уточнённым значениям параметра k_j для 6 компонентов ТБО, но используя несколько различные данные о морфологическом составе ТБО. На основе значений параметра k из модели LandGEM (адаптированный вариант) нами получены два средневзвешенных значения для Украины: в первом случае расчет проводился на основе данных о площади областей (0.0948), а во втором – по данным о морфологическом составе ТБО Украины (0.0849). Как видим из табл. 1, результат также различается.

Национальная модель оперирует национальными значениями параметра k_j (Национальный Кадастр..., 2015), которые получены на основе полевых исследований, проведенных НТЦ «Биомасса». В работе (Шмарин и др., 2014б) показана целесообразность использования региональных значений k_j из адаптированного варианта модели LandGEM (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009). Например, показано, что использование региональных значений k_j позволяет скорректировать выбросы метана в сторону их уменьшения от 10 до 18%. Среднее значение параметра k для Украины (табл. 1) получено методом средневзвешенного из площади области и соответствующего для неё набора региональных значений k_j . Для Одесской области данный параметр получен по данным о морфологическом составе ТБО из работы (Шмарин и др., 2014а). Как видно из приведенных данных, значения k_j на разных уровнях детализации различаются. Различные данные о морфологическом составе ТБО незначительно влияют на среднюю величину параметра k (колонка «Национальная модель» в табл. 1).

В зависимости от цели и объекта исследования, можно оперировать региональными или национальными значениями параметра k по умолчанию или полученными на основе региональных данных. Допускается использовать значения параметра k из других моделей.

Уточнение параметра MCF. В рассматриваемых моделях тип места захоронения ТБО учитывается посредством показателя MCF . Этот показатель позволяет скорректировать величину образования метана в зависимости от условий складирования ТБО на полигоне или свалке. Как видим из табл. 2, полигоны ТБО, на которых создаются анаэробные условия, продуцируют больше метана, чем неглубокие свалки.

На национальном уровне рекомендуется использовать значения параметра MCF , полученные на основе распределения масс ТБО по первым четырем типам свалок и полигонов (Руководящие принципы..., 2006). Для неклассифицированных полигонов и свалок рекомендуется пользоваться значением $MCF_i = 0.6$ по умолчанию. При составлении Кадастра для Украины было проведено уточнение данного параметра, что повышает точность расчетов (Национальный Кадастр..., 2015).

Аналогичные уточнения можно провести на региональном уровне. Для примера, рассмотрим уточнения параметра MCF для территории Одесской области. В Национальном Кадастре указано, что свалки, расположенные вблизи городов с населением 50 тыс. человек и более, представляют собой образования с глубиной отходов более 5-10 м и могут быть отнесены к неуправляемым глубоким свалкам ($MCF = 0.8$). Свалки около населенных пунктов с количеством жителей менее 50 тыс. не достигают глубины 5 м и могут быть отнесены к неуправляемым неглубоким свалкам ($MCF = 0.4$). К управляемым полигонам ($MCF = 1.0$), согласно (Руководящие принципы..., 2006), относят контролируемые места удаления отходов, когда отходы направляются на специальные площадки, где в определенной мере контролируются выбросы и защита от возгорания и должно соблюдаться хотя бы одно из условий: укрытие отходов, механическое уплотнение или послойная укладка.

Для уточнения значения параметра MCF для Одесской области представим распределение годового объема ТБО с учетом фактического количества поступающих отходов на наиболее крупные свалки, а в случае отсутствия данных – на основе удельного образования ТБО и количества жителей (рис. 1).

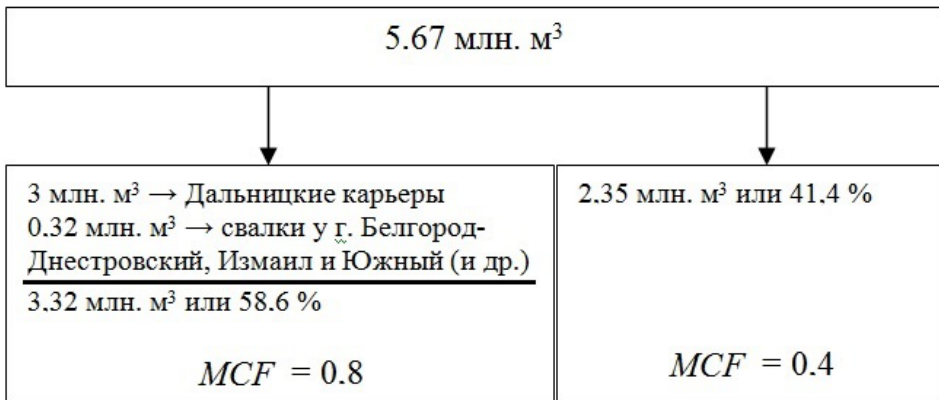


Рисунок 1. Распределение годового объема ТБО по свалкам и полигонам Одесской области

В соответствии с представленным распределением (рис. 1), значение параметра MCF для Одесской области составляет 0.63. В случае отнесения наибольшего полигона области – Дальницких карьеров – к категории управляемых, значение параметра MCF увеличится до 0.74.

При расчете образования метана за длительный период времени (рекомендуется проводить расчет за 3-5 периодов полураспада, а для Украины это 40-70 лет) необходимо учитывать изменения параметра MCF .

Таким образом, основными факторами, которые могут быть уточнены на региональном уровне, являются: морфологический состав ТБО, климатические условия и тип места захоронения ТБО.

Результаты

Определение эмиссии ПГ от мест захоронения ТБО с использованием рассматриваемых моделей проводилось нами для условий Одесской области (Украина). Одесская область является одной из крупнейших областей Украины, а по численности населения занимает 15 место. Она имеет развитый хозяйственно-промышленный, рекреационный комплекс и играет важную роль в национальном хозяйстве страны. Проведенный эколого-географический анализ ситуации с захоронением ТБО в Одесской области (Сафранов и др., 2016) показал, что проблема неэффективного обращения с отходами является актуальной для Одесской области, где почти весь объем образованных отходов подлежит удалению в специально отведенные места. В среднем такие объекты занимают 0.03% площади области и характеризуются положительной динамикой изменения площади и количества. Так, за период 2011-2013 гг. динамика изменения средней площади одного полигона (свалки) составила 1.7. Общее количество полигонов и свалок в 2012 г. составило 563 и существует необходимость создания 52 новых полигонов (один из самых высоких показателей в Украине) площадью 119.38 га при общей площади уже существующих полигонов и свалок – 978.1 га. Наибольший полигон области, обслуживающий Одесскую агломерацию – Дальницкие карьеры – входит в семерку наиболее опасных свалок Украины.

Согласно Паспорту жилищно-коммунального хозяйства, в 2013 г. в Одесской области образовалось 5.67 млн.м³ или 989.7 тыс. т ТБО. Нами проведены расчеты величины эмиссии ПГ с использованием Национальной модели, моделей IPCC и LandGEM. Основные параметры для расчетов эмиссии метана по Национальной и IPCC моделям (с помощью электронных таблиц IPCC Waste Model), которые приняты в зависимости от региональных условий: параметр k_j (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009); морфологический состав отходов (Шмарин др., 2014а); уточнённый параметр $MCF = 0.63$. Значения остальных переменных приняты в соответствии с методиками.

При работе с электронными таблицами LandGEM Version 3.02 нами заданы специфические для Одесской области значения параметров $k = 0.075 \text{ год}^{-1}$ и (табл. 1) и $L_0 = 133 \text{ м}^3 \text{ т}^{-1}$, которые получены методом средневзвешенного по значениям параметра k_j и L_0 из адаптированного варианта модели LandGEM (Ukraine Landfill Gas Model..., 2009), где в качестве «веса» выступал морфологический состав ТБО Одесской области (Шмарин и др., 2014а).

Результаты расчетов представлены в табл. 3. В расчетах период продуцирования составляет 80 лет и выбран по рекомендациям зарубежных моделей.

Таблица 3. Результаты расчета эмиссии метана и других ПГ при захоронении годового объема (за 2013 г.) ТБО Одесской области

Показатели	Модели (методики)		
	Национальная модель	IPCC	LandGEM
Эмиссия метана на 2014 г., т	1602.11 / 1390.27*	1452	6339 / 3194*
Суммарная эмиссия метана за период продуцирования, т	29216.08 / 25411.29*	27092.89	44162.90*
Эмиссия других ПГ на 2014 г., т	–	–	CO ₂ – 17390 / 8764.56* НЛОС – 272.5/137.34*

Примечание. * При уточнённом параметре $MCF = 0.63$;

** в украинском варианте модели LandGEM

Расчетные значения эмиссии метана выше, чем реальные. Так, в работе (Пухнюк, 2011) проводились расчеты по методикам IPCC и Ukraine LFG Model, показаны различия в параметрах k_j и L_0 рассматриваемых методик и сравнение полученных результатов с лабораторными исследованиями газобразования на трех украинских полигонах. Автором был сделан вывод о том, что расчетные результаты в 2-5 раза выше реальных результатов наблюдений. Аналогичные сравнения проведены в работе (Волюнкина, Домнин, 2014), где результаты расчетов по Ukraine LFG Model оказались на 36% выше полученных насосным тестом со свалки г. Новокузнецк (Россия). Хотя в представленной статье не приводятся данные натурных измерений образования метана на отдельных полигонах в Одесской области и сравнение их с расчетными значениями, выводы, полученные в упомянутых выше работах, говорят о необходимости дальнейшего совершенствования моделей расчета. Это особенно важно в случае применения моделей для оценки эмиссии ПГ от территорий (не конкретных полигонов ТБО), для которых натурные измерения невозможны.

Дискуссия

Как видим из результатов, представленных в табл. 3, применение трех расчетных методик дает различные результаты. Более близкими являются результаты, полученные по Национальной модели и модели IPCC. Особенно в случае использования уточнённого значения $MCF = 0.63$. Незначительные различия можно объяснить тем, что в первом случае дополнительно учитываются такие компоненты ТБО, как кожа и резина. От данных результатов существенно отличаются результаты расчета по модели LandGEM. Модель LandGEM разрабатывалась на основе исследований, проводимых на американских полигонах. Как отмечается в работе (Лучшие методы..., 2012), применительно к украинским условиям модель LandGEM дает достаточно завышенные результаты. К недостаткам исходной модели LandGEM можно отнести отсутствие учета морфологического состава ТБО при выборе параметров k и L_0 , хотя при работе с электронными таблицами LandGEM Version

3.02 нами были использованы значения, рассчитанные для Одесской области. Существенным недостатком применения адаптированного варианта модели LandGEM к территориальным единицам является невозможность определения параметра F по причине отсутствия данных о масштабах и глубине выгорания отходов на отдельных свалках. Хотя в работе (Пухнюк, 2011) для обеспечения консервативной оценки биогазового потенциала свалок Украины предлагается значение $F = 0.8$. В Национальной и IPCC моделях фактическое выгорание части органического вещества в теле полигона не учитывается.

К преимуществам инструмента LandGEM Version 3.02 можно отнести возможность расчета эмиссии биогаза и других, кроме метана, ПГ. Впрочем, такие результаты можно получить как производные от результатов расчетов по другим методикам, основываясь на соотношении между компонентами биогаза. Модель LandGEM в оригинальном и адаптированном вариантах подходит для использования в условиях конкретного места захоронения ТБО.

Как отмечалось выше, в основе всех моделей лежит дифференциальное уравнение реакции разложения органического вещества в теле полигона, но отличия в значениях отдельных параметров и в математическом аппарате моделей приводят к расхождению результатов.

Наиболее проработанной представляется Национальная модель, а ее параметры могут быть уточнены на основе соответствующих исследований в рамках моделей IPCC и LandGEM. Национальная модель универсальна и может быть использована как для определенного места захоронения, так и для территории (региональный и национальный уровень). Для определения эмиссии метана по Национальной модели с территории отдельных областей Украины нами рекомендуется использовать региональные значения параметра k из Ukraine LFG Model. В перспективе для уточнения параметров модели на региональном и национальном уровнях необходимо определение значений параметра k на основе климатического районирования территории.

Более комплексная оценка эмиссии ПГ из мест захоронения ТБО заключается в представлении расчетов эмиссии других, кроме метана, ПГ. Поэтому, как вариант, возможна адаптация уравнений, описывающих изменения запасов углерода, для расчета эмиссии CO_2 от мест захоронения отходов из Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК (2006), сектор «Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования».

Список литературы

Волынкина Е. П., Домнин К. И. 2014. Математическая модель для прогнозных расчетов образования и извлечения свалочного газа на закрытых свалках ТБО. – Вестник Сибирского государственного индустриального университета, № 3(9), с. 62-70.

ДБН В.2.4-2-2005 Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. 2005. – Держбуд України, 68 с.

Исследования газообразования на наиболее крупных полигонах ТБО и переход на трехкомпонентную национальную модель расчетов выбросов ПГ от свалок ТБО в Украине: отчет о НИР. 2012. – Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины, 82 с.

Лучшие методы реализации биогазовых энергетических проектов на полигонах ТБО. 2012. – Агентство защиты окружающей среды США, отв. ред. пер. Ю. Б. Матвеев, 139 с. – Электронный ресурс. URL: <http://biomass.kiev.ua/useful-info/background-materials/1120-gmi-brochure> (дата обращения 14.04.2017).

Национальный Кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990-2013 гг. 2015. – Міністерство екології та природних ресурсів України, 569 с. – Электронный ресурс. URL: http://www.menr.gov.ua/docs/klimatychna-polityka/UKR_NIR_2015_final.pdf (дата обращения 14.04.2017).

Пухнюк А. Ю. 2011. Исследование газообразования на старых украинских полигонах твердых бытовых отходов. – Промышленная теплотехника, т. 34, № 4, с. 83-93.

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, т. 5. Отходы. 2006. – Электронный ресурс. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol5.html> (дата обращения 14.04.2017)

Сафранов Т. А., Приходько В. Ю., Шанина Т. П. 2016. Проблема розміщення відходів на звалищах та полігонах Одеської області. – Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, вип. 14, с. 83-90.

Шмарин С. Л., Алексеев И. Л., Филозоф Р. С., Ремез Н. С., Денафас Г. 2014а. Содержание биоразлагаемых компонентов в составе твердых бытовых отходов в Украине. – Экология и промышленность, № 1, с. 79-83.

Шмарин С.Л., Сливинская В.В., Ремез Н.С., Филозоф Р.С., Нахшина А.Д., Михайленко В.П. 2014б. Влияние климатических факторов на оценку выбросов парниковых газов с мест захоронения твердых бытовых отходов в Украине. – Фізична географія та геоморфологія, вип. 2(79), с. 133-140.

Landfill Gas Emission Model (LandGEM) Ver. 3.02: User's Guide. 2005. – U.S. EPA, Washington, U.S. EPA, 48 p. – Available at: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (accessed 14 April 2017).

Ukraine Landfill Gas Model Ver.1.0: User's Manual. 2009. – U.S. EPA; edited by Swapura Ganguli, G. Alex Stege, Washington, U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program, 28 p. – Available at: https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf (accessed 14 April 2017).

What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management. 2012. – Daniel Hoornweg, Perinas Bhada-Tata, 116 p. – Available at: <http://siteresources.worldbank.org/> (accessed 14 April 2017).

References

Volynkina E. P., Domnin K. I. 2014. Matematicheskaja model' dlja prognoznyh raschetov obrazovanija i izvlechenija svalochnogo gaza na zakrytyh svalkah TBO [Mathematical model for forecast calculations of landfill gas formation and extraction in closed solid waste dumps]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta – Bulletin of Siberian state industrial university*, vol. 3(9), pp. 62-70.

DBN V.2.4-2-2005 Poligoni tverdikh pobutovikh vidkhodiv. Osnovni polozhennia proektuvannia [Landfills. The basic design provisions]. 2005. Ukraine state building Publ., 68 p.

Issledovanija gazoobrazovanija na naibolee krupnyh poligonah TBO i perehod na trehkomponentnuju nacional'nuju model' raschetov vybrosov PG ot svalok TBO v Ukraine: otchet o NIR [The research of gas formation at the largest landfills and transition to a three-component national model for calculating GHG emissions from landfills in Ukraine: a report of research]. 2012. Kiev, Institute of Engineering Thermophysics Ukraine National Academy of Sciences Publ., 82 p.

Luchshie metody realizacii biogazovyh jenergeticheskikh proektov na poligonah TBO [International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Project]. 2012. EPA, 140 p. URL: http://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_IBPG_complete.pdf (accessed 14 April 2017).

Nacional'nyj Kadastr antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotiteljami parnikovyh gazov v Ukraine za 1990-2013 gg. [National Inventories of anthropogenic emissions from sources and removal by greenhouse gases absorbers in Ukraine in 1990-2013]. 2015. Kiev, 569 p. URL: http://www.menr.gov.ua/docs/klimatychna-polityka/UKR_NIR_2015_final.pdf (accessed 14 April 2017).

Puhnjuk A. Ju. 2011. Issledovanie gazoobrazovanija na staryh ukrainskikh poligonah tverdih bytovyh othodov [Investigation of gas formation at old Ukrainian solid waste landfills]. 2011. *Prom. teplotehnika – Industrial heat engineering*, vol. 34 (no. 4), pp. 83-93.

2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 5: Waste. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> (Accessed 14 April 2017).

Safranov T. A., Prihod'ko V. Ju., Shanina T. P. 2016. Problema rozmishchennia vidkhodiv na zvalishchakh ta poligonakh Odes'koï oblasti [The problem of waste disposal on landfills and dumps of the Odessa region]. *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universitetu im. V. N. Karazina – Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv national university*, vol. 14, pp. 83-90.

Shmarin S. L., Alekseevec I. L., Filozof R. S., Remez N. S., Denafas G. 2014. Soderzhanie biorazlagaemykh komponentov v sostave tverdych bytovykh otkhodov v Ukraine. [The content of biodegradable components in municipal solid waste in Ukraine]. *Jekologija i promyshlennost' – Ecology and industry*, vol. 1, pp. 79-83.

Shmarin S.L., Slivinskaya V.V., Remez N.S., Filozof R.S., Nakhshina A.D., Mykhaylenko V.P. 2014. Vlijanie klimaticheskikh faktorov na ocenku vybrosov parnikovyh gazov s mest zahoronenija tverdyh bytovykh othodov v Ukraine [Influence of climatic factors on estimation of greenhouse gas emissions from the burial place solid waste in Ukraine]. *Fizichna geografija ta geomorfologija. – Physical geography and geomorphology*, vol. 2(79), pp. 133-140.

Landfill Gas Emission Model (LandGEM) Ver. 3.02: User's Guide. 2005. – U.S. EPA, Washington, U.S. EPA, 48 p. – Available at: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (accessed 14 April 2017).

Ukraine Landfill Gas Model Ver.1.0: User's Manual. 2009. – U.S. EPA; edited by Swapura Ganguli, G. Alex Stege, Washington, U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program, 28 p. – Available at: https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf (accessed 14 April 2017).

What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management. 2012. – Daniel Hoornweg, Perinas Bhada-Tata, 116 p. – Available at: <http://siteresources.worldbank.org/> (accessed 14 April 2017).

Статья поступила в редакцию: 26.04.2017 г.

После переработки: 19.07.2017 г