

УДК 657.471.23:662.767.2

**Пухнюк А.Ю.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗООБРАЗОВАНИЯ НА СТАРЫХ УКРАИНСКИХ ПОЛИГОНАХ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Для оцінки енергетичного потенціалу біогазу та емісії парникових газів на полігонах твердих побутових відходів застосовуються математичне моделювання газоутворення та експериментальні методи дослідження. В роботі виконано порівняння результатів моделювання газоутворення з результатами лабораторних та польових досліджень на декількох українських полігонах ТПВ.

Для оценки энергетического потенциала биогаза и эмиссии парниковых газов на полигонах твердых бытовых отходов применяются математическое моделирование газообразования и экспериментальные методы исследования. В работе выполнено сравнение моделирования газообразования с результатами лабораторных и полевых исследований на нескольких украинских полигонах ТБО.

Mathematical modeling and experimental investigations are used for assessment of landfill gas (LFG) generation and utilization potential, and assessment of greenhouse gas emissions from municipal solid waste (MSW) landfills. In paper results of LFG modeling are compared with laboratory and field investigations at several Ukrainian MSW landfills.

$DOC$  – разлагаемый органический углерод;  
 $F$  – поправочный коэффициент для учета возгораний;  
 $GB_{21}$  – тест на газообразование;  
 $k_j$  – параметр скорости образования метана;  
 $L_0$  – потенциал образования метана;  
 $MCF$  – поправочный коэффициент метанообразования;  
 $OX$  – поправочный коэффициент окисления метана;  
 $RA_4$  – тест на респираторную активность;  
 $W$  – количество вывезенных отходов;

$\phi$  – поправочный коэффициент неточности модели;  
 БГ – биогаз;  
 ВВ – влажное вещество;  
 МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата;  
 л н.у. – литр при нормальных условиях  
 ОВ – органическое вещество;  
 ОУ – (общий) органический углерод;  
 СВ – сухое вещество;  
 ТБО – твердые бытовые отходы.

### 1. Введение

Несмотря на современные тенденции сокращения захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) в развитых странах, складирование ТБО на полигонах еще долго будет оставаться наиболее распространенной практикой в развивающихся странах и в странах с переходной экономикой. Биогаз (БГ) из ТБО, основными компонентами которого являются парниковый газ метан и двуокись углерода, образуется при разложении органических отходов в анаэробных условиях в теле полигона. До недавнего времени на полигонах и свалках ТБО развивающихся стран системы сбора БГ отсутствовали, однако в последние годы большое количество проектов по сбору БГ в этих

странах были инициированы в рамках реализации финансовых механизмов Киотского протокола (КП).

Для технико-экономической оценки и проектирования систем сбора БГ необходимо надежное прогнозирование его количества. Статистические данные Рамочной конвенции ООН по изменению климата по проектам сбора БГ, реализованным в качестве проектов механизма чистого развития КП в 2003 – 2010 годах, продемонстрировали недопоставку единиц сокращения выбросов по сравнению с исходными прогнозами, в среднем, около 50 % [1].

Наиболее существенной причиной расхождений считается переоценка потенциала газо-

образования в связи с наличием факторов неопределенности моделирования, связанных с недостаточностью входных данных о характеристиках отходов, условиях в теле полигона и влиянии методов эксплуатации. Модели газообразования, широко применяемые для оценки потенциала выхода БГ, были разработаны для климатических условий и высоких стандартов захоронения отходов развитых западных стран. Применение моделей в странах с другим составом отходов, неразвитой системой управления ТБО может приводить к существенным погрешностям.

## 2. Модели газообразования

Модели газообразования описывают изменение образования БГ во времени в зависимости от состава и графика захоронения отходов. В последнее время чаще всего используются модели, основанные на кинетике распада первого порядка (РПП). Используются простые однокомпонентные и многокомпонентные варианты модели. Согласно исследованиям [2], многокомпонентные модели, которые учитывают индивидуальные свойства отдельных фракций отходов, дают более точные результаты. Многокомпонентная (многофазная) модель 1-го порядка рекомендована к использованию МГЭИК для расчета эмиссии метана на полигонах ТБО при подготовке национальных кадастров выбросов парниковых газов.

В работе были использованы два варианта многофазных моделей РПП: модель МГЭИК и украинская модель газообразования для полигонов ТБО (Версия 1.0, 2009). В качестве параметров обе модели используют скорость образования метана  $k_j$  и содержание разлагаемого органического углерода ( $DOC_j$ ) для отдельных фракций отходов и включают поправочные коэффициенты для учета местного климата и условий на полигонах.

*Многофазная модель МГЭИК.* Согласно «Методологии для определения выбросов метана с мест захоронения твердых бытовых отходов» МГЭИК (Версия 05.1.0, далее – «методология МГЭИК», [3]), выход метана с по-

верхности полигона ТБО  $Q_{CH_4, y}$  (тонн в году  $y$ ) оценивается следующим образом:

$$Q_{CH_4, y} = \varphi \cdot 16 / 12 \cdot (1 - OX) \cdot DOC_f \cdot MCF \times \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-k_j(y-x)} \cdot (1 - e^{-k_j}),$$

где  $W_{j,x}$  – количество органических отходов фракции  $j$  в году  $x$  (тонн).

Поправочный коэффициент модели  $\varphi$  применяется для учета возможной погрешности моделирования (по умолчанию 0,9). Доля органического углерода, разлагающегося в анаэробных условиях  $DOC_f$ , по умолчанию равна 0,5. Поправочный коэффициент окисления метана ( $OX$ ), равный 0,1, применяется в случае наличия на полигоне специального верхнего покрывающего слоя (почвы или компоста), в котором происходит окисление метана. На исследуемых полигонах этот коэффициент был принят равным нулю. Поправочный коэффициент метанообразования ( $MCF$ ) учитывает долю аэробности полигонов и изменяется в пределах 0,4...1,0 (для крупных украинских полигонов наиболее часто используется значение 0,8).

*Разлагаемый органический углерод (DOC).* По рекомендациям МГЭИК используются следующие значения  $DOC$  (% ВВ) для фракций органических отходов: древесина – 43 %, бумага и картон – 40 %; пищевые отходы – 15 %; текстиль – 24 %; садово-парковые отходы – 20 %. Для оценки доли фракций в общем потоке ТБО использовался усредненный морфологический состав отходов в Украине, рассчитанный на основании исследований состава ТБО, проведенных в период 2004 – 2012 гг. в 16 городах Украины [4– 6]: пищевые отходы – 36,1 %, садовые отходы – 9,8 %, бумага и картон – 14,3 %, текстиль – 3,4 %, древесина – 1,9 %, резина, кожа, кости – 2,2 %, другие органические отходы – 0,4 %.

*Украинская модель газообразования* разработана в 2009 г. при поддержке программы «Метан на рынок» Агентства по охране окружающей среды США [7] на базе модели газообразования LandGEM (Агентство по охране

окружающей среды США, версия 3.02, 2005) и имеет аналогичную многофазную структуру:

$$Q_{CH_4,y} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0[W_i / 10] \times e^{-kt_{ij}} \times (MCF) \times (F).$$

*Потенциал метанообразования ( $L_0$ )* характеризует удельный потенциал образования метана из тонны отходов и определяется на основании рекомендуемого в модели LandGEM значения 100 м<sup>3</sup>/т ТБО с содержанием сухого вещества (СВ) 44 % и оцененного влагосодержания органических фракций ТБО.

*Скорость образования метана ( $k_j$ )*. В методологии МГЭИК константа  $k_j$  отличается по категориям отходов и климатическим условиям. Среднегодовая температура в Украине составляет + 6...13 °С, среднегодовой уровень осадков (О) – 610 мм, средний уровень суммарной эвапотранспирации (ЭТ) – 530 мм. Таким образом,  $k_j$  выбирались для умеренного (среднегодовая  $T < 20$  °С) и влажного климата (О/ЭТ > 1). Значения  $k_j$  в украинской модели определены для каждой группы отходов на основании типа отходов и климата области Украины, где расположен полигон. Каждая

административная область отнесена к одному из 4-х климатических регионов. Средний уровень осадков для региона полигонов А, Б составляет 500...599 мм/год, для полигона В – 430...499 мм/год. Применяемые коэффициенты потенциала образования БГ (содержание СН<sub>4</sub> – 50 %),  $L_0$  и скорости образования метана  $k_j$  приведены в табл. 1.

*Поправочный коэффициент для учета возгораний (F)*. По данным операторов полигонов на них могут случаться возгорания, во время которых происходит окисление органического вещества отходов и метана. Модель дисконтирует образование БГ с учетом процента площади полигона, попавшей под воздействие пожаров и коэффициента интенсивности их влияния (1/3 для низкой интенсивности, 2/3 для средней интенсивности, и 1 для высокой интенсивности). Для обеспечения консервативной оценки потенциала БГ были использованы следующие предположения: площадь воздействия – 30 %, интенсивность воздействия – средняя ( $F = 0,8$ ).

### 3. Цели и методы исследования

В работе обсуждаются результаты иссле-

Табл. 1. Применяемые коэффициенты потенциала газообразования  $L_0$  и скорости образования метана  $k$

Тип отходов	Модель МГЭИК	
	$L_0$ , м <sup>3</sup> БГ /т ВВ	$k$ , 1/год
Быстроразлагающиеся (пищевые отходы)	154	0,185
Умеренноразлагающиеся (садово-парковые отходы)	205	0,10
Медленноразлагающиеся		
– бумага, картон	410	0,06
– текстиль и др.	246	0,06
– древесина	439	0,03
<b>Среднее:</b>	<b>157</b>	
	Украинская модель	
Быстроразлагающиеся (пищевые отходы)	138	0,140
Умеренноразлагающиеся (садовые отходы)	253	0,070
Умеренно-медленно разлагающиеся (бумага, картон, текстиль)	428	0,028
Медленноразлагающиеся (древесина и др.)	403	0,014
<b>Среднее:</b>	<b>167</b>	

дований четырех украинских полигонов, проведенных с целью оценки потенциала газообразования перед инвестированием в коммерческие системы сбора БГ. Программа исследований включала определение химических, биологических характеристик и остаточного потенциала метанообразования образцов отходов с полигонов в лабораторных условиях, а также проведение тестовой откачки БГ на полигонах. Результаты, полученные в лабораторных и полевых исследованиях, сравнивались с результатами моделирования БГ, а также с фактическими данными по сбору БГ, полученными в процессе эксплуатации полномасштабной системы сбора БГ.

### **3.1. Описание полигонов и методов исследования**

*Полигон А* эксплуатировался с 1967 по 2010 г. Площадь полигона – 14,3 га, масса накопленных отходов – 2,6 млн. т, глубина – до 30 м. В 2008-2010 годах поверхность полигона покрыта глино-почвенной смесью. В 2008 г. на полигоне проводился 30-ти дневный насосный тест с использованием трех скважин. Оценка радиуса влияния скважин проведена с помощью измерения разрежения в теле полигона на различных расстояниях от скважин. Проведена оценка удельного выхода БГ на единицу массы отходов.

*Полигон Б* обслуживает тот же населенный пункт, что и полигон А, находится в эксплуатации с 1976 г.; количество накопленных отходов (на 2010 г.) – 2,7 млн.т. Кроме бытовых отходов на полигон могли поступать инертные отходы промпредприятий. Во время эксплуатации были зафиксированы пожары, в том числе во время проведения полевых исследований наблюдались очаги возгораний по периметру полигона. В декабре 2009 г. на полигоне обустроены скважины глубиной до 16 м. Во время бурения было тобрано пятнадцать образцов ТБО массой до 5 кг с глубины от 3 до 15 метров.

*Полигон В* эксплуатируется с 1981 г., количество накопленных отходов по данным оператора – 3 млн. т. На обследованных участ-

ках есть промежуточное почвенное покрытие. В 2006 г. на полигоне отобраны семь образцов отходов с глубины от 4 до 11 м в разных частях полигона. Во время отбора по периметру полигона также наблюдались очаги задымления.

*Полигон Д* площадью 14 га и глубиной 15...16 м принимает ТБО с 1961 г., верхнее покрытие отсутствует. По данным оператора количество накопленных отходов составляет 4 млн. т. На полигоне было пробурено 10 скважин глубиной 9...11 м. Образцы массой до 5 кг (13 шт.) были отобраны на двух площадках из 5 скважин (с глубины от 3-х до 12 метров).

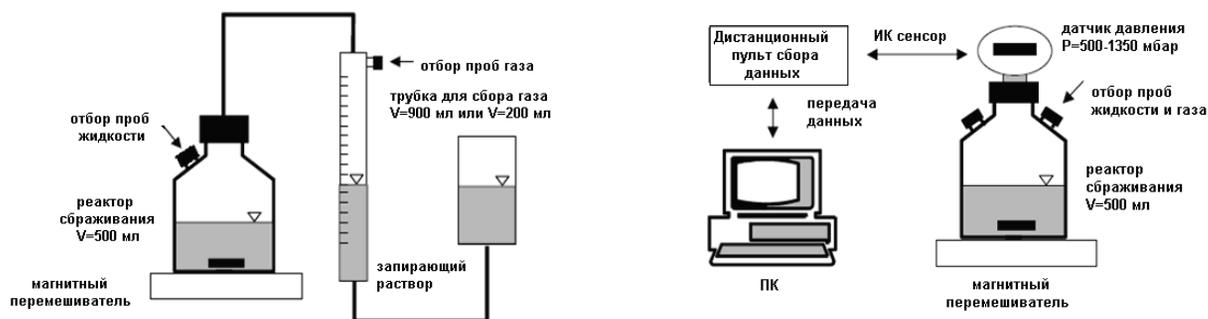
Все четыре исследуемых объекта не могут считаться инженерными полигонами, являясь по существу простыми свалками, поскольку для них характерны отсутствие промежуточной пересыпки и недостаточное уплотнение отходов, отсутствие гидроизоляционного слоя на дне, поверхности и склонах полигона, наличие возгораний, отсутствие системы управления фильтратом и сбора биогаза и др.

### **3.2 Лабораторные исследования**

Программа исследования образцов, собранных на полигонах Б, В, Д, включала измерение влажности, содержания органического вещества (ОВ) и общего органического углерода (ОУ). Для образцов с полигона Б дополнительно проводились биологические тесты на газообразование и респираторную активность в Технологическом университете Гамбург-Харбург (ТУНН, Германия).

Стандартный тест на газообразование ( $GB_{21}$ ) используется для определения потенциала газообразования органических веществ – отходы сбрасываются в анаэробном реакторе объемом 0,5 л при температуре 35 °С в присутствии инокулянта. Тест проводился объемным и манометрическим способом (рис. 1).

Тест на респираторную активность ( $RA_4$ ) позволяет оценить способность к биологическому разложению органического вещества в аэробных условиях и служит дополнительным индикатором степени биологической стабилизации отходов. Тест  $RA_4$  был выпол-



**Рис. 1. Объемный (слева) и манометрический (OxiTop®) методы оценки потенциала образования БГ [6].**

нен в лабораторном респирометре (IBUK Co, Германия), в котором измеряется потребление кислорода (мг O<sub>2</sub>/г СВ) при аэробном разложении органического вещества в течение 4 дней при T = 20 °С.

Подготовка образцов для биологических тестов включала измельчение до размера < 20 мм и гомогенизацию, до этого были изъяты вручную не поддающиеся дроблению инертные вещества (камни, металлы и др.). До начала программы измерений образцы хранились в замороженном состоянии при температуре – 18 °С.

#### 4. Результаты исследований

##### 4.1. Исследование общих свойств образцов отходов

Результаты исследования образцов с полигонов Б, В, Д приведены в таблице 2.

*Полигон Б.* В отходах с глубины 3 м на участке меньшего возраста (Б2, Б4) визуально различались фракции ТБО – смешан-

ная органика, бумага, текстиль, древесина, в то время как на глубинах ≥ 6 м скважин Б2, Б4 и по всей глубине скважины Б1 отходы имели однородный характер влажной темно-серой песчано-почвенной массы с включениями медленноразлагаемых фракций ТБО (древесины, текстиля, изредка картона), инертных отходов (камней, стекла) и повышенным относительным содержанием пластика. Во время бурения встречались слои шлака, который, по-видимому, использовался для пересыпки отходов. Влажность отходов повышалась с глубиной, однако накопление фильтрата на глубине не было обнаружено. Содержание инертных материалов (камни, стекло, металлы), отсортированных перед измельчением образцов, составляло в среднем 36 ± 10 % массы (до 50...60 % в двух образцах). Измеренные в лаборатории значения ОВ и ОУ были скорректированы с применением понижающего коэффициента для учета отсортированных перед измельчением инертных материалов. Сред-

Табл. 2. Характеристики образцов, отобранных на полигонах Б, В, Д

Параметр	Полигон Б	Полигон В	Полигон Д
Год начала работы/год закрытия	1976/2007	1981/2003	1961/2010
Год отбора проб	2009	2006	2009/2011
Отсортированные инертные материалы, % СВ	19...36	–	3...49
Влажность, %	23,1 ± 5,5	33,4 ± 6,6	43,3 ± 7,6
Органическое вещество (ОВ), % СВ	9,4 ± 2,9	14,43 ± 3,16	20,6 ± 7,1
Общий органический углерод (ОУ), % СВ	4,7 ± 1,8	5,41 ± 1,19	9,1 ± 2,5
CaCO <sub>3</sub> , % СВ	9,1 ± 5,7	–	3,5 ± 1,9

няя влажность образцов составляла  $23 \pm 6 \%$ , содержание органического вещества (ОВ) находится в диапазоне 10...21 % для 13 из 15 образцов (для двух образцов – 24 % и 5 %), а с учетом предварительного отбора инертных материалов –  $9 \pm 3 \%$ . Содержание ОУ с учетом отсортированных инертных компонентов –  $5 \pm 2 \%$ .

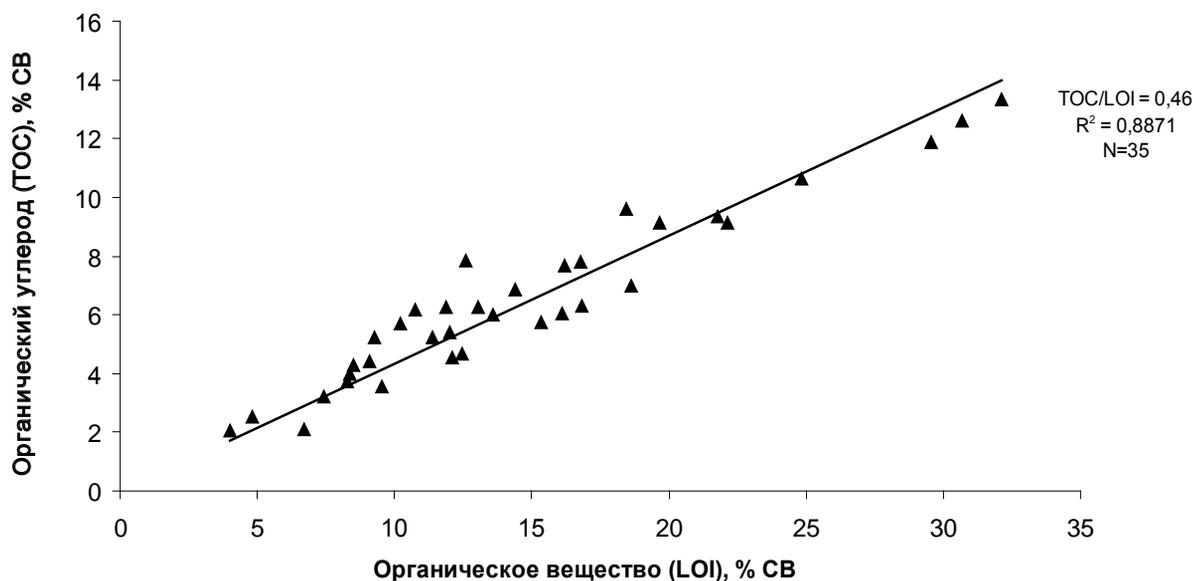
*Полигон В.* В образцах отходов наблюдалось влагосодержание в диапазоне 25...42 %, низкое содержание ОВ (9,5...18,6 %) и ОУ (3...7 %).

*Полигон Д.* Образцы, отобранные на этом полигоне, отличаются относительно высоким содержанием ОВ и ОУ (9...32 % и 5...13 % соответственно), что может свидетельствовать о меньшей степени разложения органических фракций, чем на полигонах Б и В. Влажность отходов высокая, на глубине от 8...9 м до дна полигона (~16 м) отходы насыщены фильтратом.

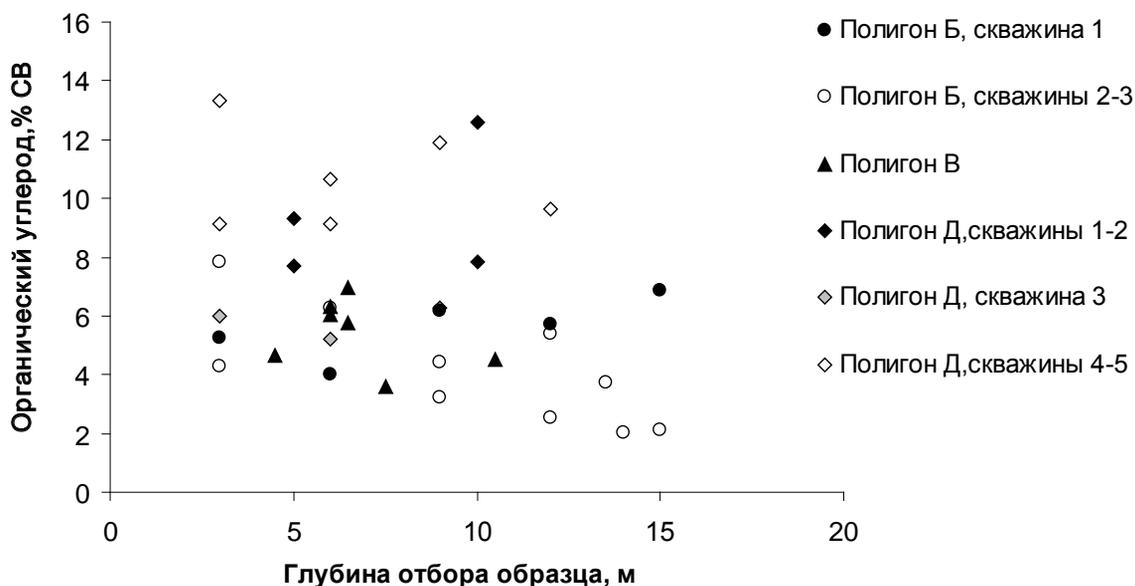
Содержание органического вещества в образцах изменяется в широком диапазоне (от 4 до 32 %), при этом соотношение ОВ и ОУ остается примерно постоянным (рис. 2) – таким образом, для оценки степени стабилизации отходов достаточно использовать один из этих двух параметров.

Как видно на рис. 3, для большинства образцов наблюдается общая тенденция уменьшения содержания ОУ с увеличением глубины образца. Однако данная тенденция нарушается для некоторых скважин и отдельных образцов, где наблюдается сравнительно высокое содержание ОВ и ОУ на больших глубинах. По-видимому, можно сделать вывод о том, что существенное влияние на количество и степень разложения органики оказывают локальные условия в теле полигона.

Измеренные значение ОВ и ОУ включают медленно разлагаемый в анаэробных условиях лигнин и неразлагаемую пластмассу. В исследовании образцов с полигона США сообщалось, что из-за присутствия пластмасс и лигнина, значение ОВ во многих случаях было выше 15 % даже для образцов с низким потенциалом метанообразования [9]. Поэтому, предполагается, что измеренные значения ОВ и ОУ представляют, в основном, неразлагаемую органику. Повышенное содержание карбоната кальция в образцах с полигона Б (в несколько раз выше, чем в образцах с полигона Д) может свидетельствовать о повышенном содержании строительных отходов.



**Рис. 2.** Общее содержание органического вещества и органического углерода в образцах с полигонов Б, В, Д.



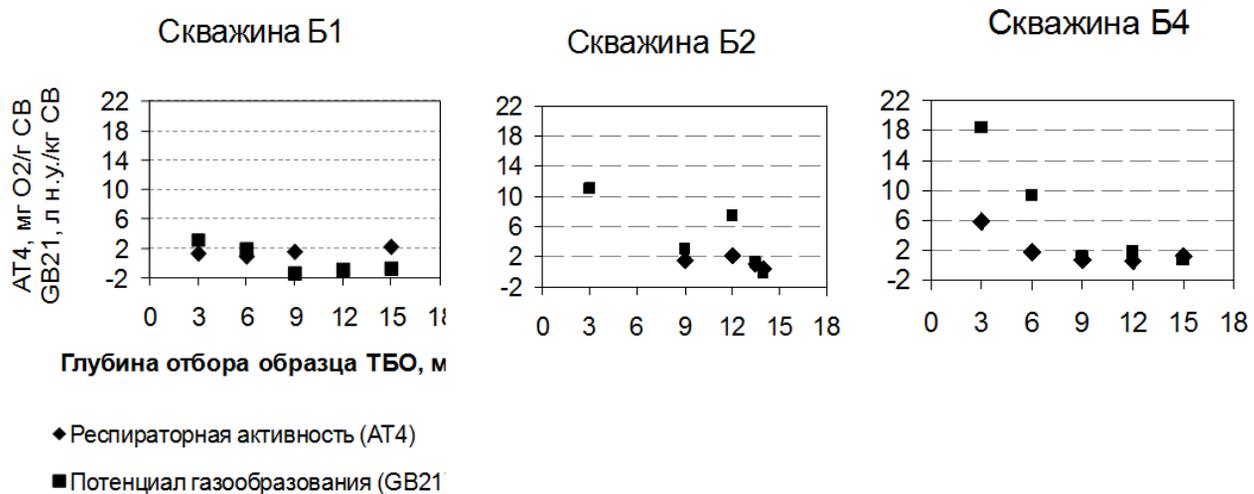
**Рис. 3. Общее содержание органического вещества и органического углерода в образцах с полигонов Б, В, Д.**

#### **4.2. Лабораторные тесты потенциала газообразования**

Результаты тестов остаточного потенциала газообразования  $GB_{21}$ , которые проводились с образцами с полигона Б, приведены на рис. 4. Наблюдается взаимосвязь между возрастом образца (глубиной его отбора) и остаточным потенциалом образования БГ. Самый высокий потенциал образования БГ был определен для образцов на глубинах 3...6 м. Образцы из двух скважин (Б2, Б4) на «новой» части полигона продемонстрировали более высокий потенциал по сравнению с образцами из скважины (Б1) с более старой части полигона. Самые высокие остаточные потенциалы газообразования были получены для трех образцов из двух скважин, взятых на глубине 3 м и 6 м в новой части полигона – от 9,3 л н.у./кг СВ до 18,5 л н.у./кг СВ. Еще три образца продемонстрировали потенциалы газообразования от 3 до 7 л н.у./кг СВ, остальные девять образцов – менее 2 л н.у./кг СВ. В нескольких образцах наблюдалось снижение газообразования инокулянта в присутствии образцов ТБО, что может быть связано с подавлением газообразования присутствующими в ТБО ингибирующими химическими компонентами

(например, тяжелыми металлами).

Необходимо отметить, что лабораторные измерения связаны с погрешностями, вызванными неомогенностью образцов и соответствующим расхождением кривых газообразования, наличием лаг-фазы (от 2-х до 5-ти дней), поэтому некоторые кривые газообразования не достигали плато в течение времени измерений. Кроме того, стандартный тест  $GB_{21}$  оценивает только часть полного потенциала производства газа. Подобные тесты газообразования, которые проводились для старых отходов в течение длительных промежутков времени (от 1 года до 6 лет) показывают, что результаты теста  $GB_{21}$  могут составлять примерно от 30 % до 60 % долгосрочного потенциала газообразования [10]. С увеличением возраста и степени разложения отходов разница между ними повышается, так как в этом случае в отходах преобладают медленно разлагаемые фракции. В дальнейшем предполагалось, что результат  $GB_{21}$  составляет 50 % общего потенциала для образцов возраста < 5 лет, 40 % для образцов возраста 5...10 лет и 30 % – для образцов возраста > 10 лет. С учетом данных предположений общий потенциал газообразования может составлять при-



**Рис. 4. Общее содержание органического вещества и органического углерода в образцах с полигонов Б, В, Д.**

близительно 37 л н.у./кг СВ для одного из измеренных образцов, от 16 до 23 л н.у./кг СВ для четырех образцов, для остальных образцов получены значения от 2 до 10 л н.у./кг СВ.

Респираторная активность 14 из 15 образцов составляет до 2 мг O<sub>2</sub>/г СВ, для одного образца с глубины 3 м – 5,8 мг O<sub>2</sub>/г СВ. Эти значения подтверждают значения низкого биогазового потенциала, которые наблюдались в тестах на газообразование. Значения GB<sub>21</sub> и RA4 приведены на рис. 4.

Согласно немецким стандартам, ТБО после механико-биологической обработки, вывоз которых разрешен на полигоны характеризуются следующими параметрами: OY ≤ 18%; GB<sub>21</sub> ≤ 20 л н.у./кг СВ; RA4 ≤ 5 мгO<sub>2</sub>/г СВ. Таким образом, большинство исследованных образцов имеют высокую степень стабилизации.

#### 4.3. Сравнение результатов моделирования и лабораторных исследований

Потенциал образования БГ по лабораторным исследованиям образцов с полигона Б сравнивался с модельными данными. На рис. 5 измеренный в лаборатории потенциал БГ представлен в сравнении со значениями, рассчитанными по описанным выше моделям (в обеих моделях применен коэффициент MCF 0,5). Показанный диапазон отклонения в верхнюю

сторону 50...70 % учитывает возможную недооценку долгосрочного потенциала в тесте GB<sub>21</sub>.

Видно, что результатам лабораторных измерений ближе к расчетным значениям по модели МГЭИК или украинской модели с применением понижающего коэффициента для учета пожаров (F = 0,8). Однако по обеим моделям даже с применением понижающих коэффициентов остаточный потенциал образования БГ ниже в 2...5 раз.

#### 4.4. Сравнение моделирования с фактическими объемами извлечения БГ

Удельный потенциал газообразования отходов на полигоне А, оцененный в насосном тесте, сравнивался с фактическими объемами извлечения БГ за период двухлетней эксплуатации полномасштабной системы сбора газа на этом полигоне с 2010 г. Во время насосного теста стабилизированный после трех недель отбора поток газа составил 44,2 м<sup>3</sup>/ч (50 % CH<sub>4</sub>). По оценке, объем отходов, находящихся в радиусе воздействия, составлял от 167,1 тыс. м<sup>3</sup> до 235,4 тыс. м<sup>3</sup>, потенциал сбора газа в 2008 г., экстраполированный на весь объем полигона – 492...693 м<sup>3</sup>/ч (1,6...2,3 м<sup>3</sup>/(год·т отходов)). С учетом эффективности сбора газа 85 % в пределах исследуемого объема отходов, уровень газообразования оценивался на уровне 580...815 м<sup>3</sup>/ч (1,9...2,7 м<sup>3</sup>/(год·т отходов)).

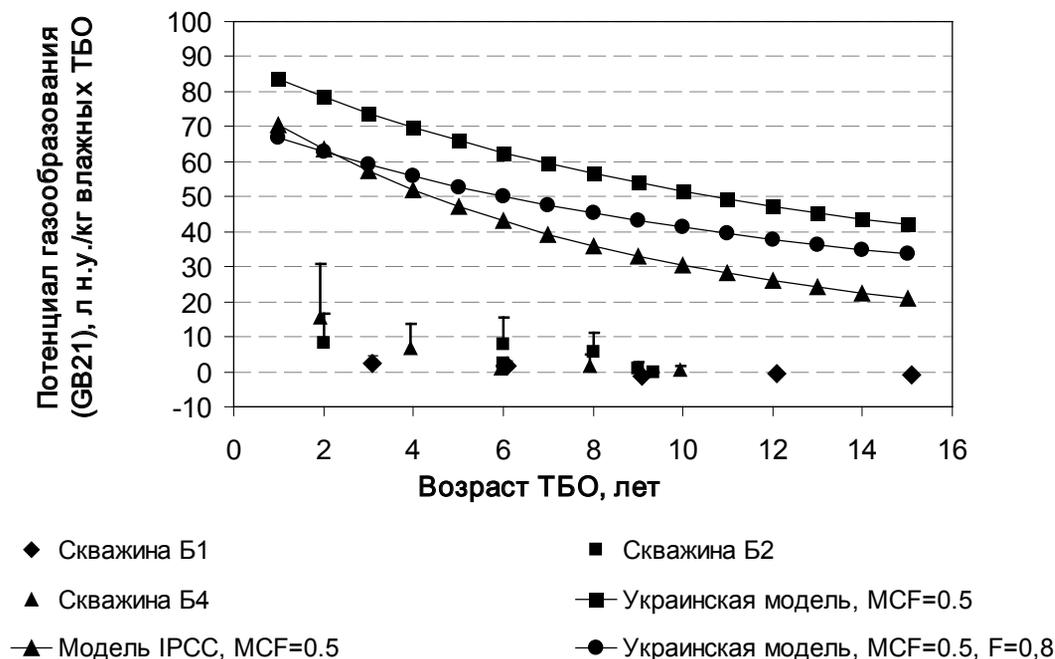


Рис. 5. Сравнение лабораторных и расчетных значений потенциала газообразования.

Образование БГ в 2010 году оценивалось с использованием моделей на уровне 542...723 м<sup>3</sup>/ч (1,8...2,4 м<sup>3</sup>/(год·т отходов)). Таким образом, результаты моделирования были близки к результатам насосных тестов. Однако, сбор БГ после двух лет работы полномасштабной системы сбора БГ в 2011 г. был на уровне 175 м<sup>3</sup>/ч (50% СН<sub>4</sub>). Принимая эффективность сбора 0,6, объем газообразования равен 292 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, фактический объем сбора газа оказался в 1,8...2,4 раза ниже, чем спрогнозированный во время насосного теста и моделирования. Поскольку полигон А получает отходы того же города и эксплуатировался таким же образом как полигон Б, данные лабораторных измерений образцов с полигона Б о низком остаточном газообразовании косвенным образом согласуются с малым количеством БГ, собранного на полигоне А.

### Выводы

Для повышения точности оценки газообразования необходимо проведение исследований, охватывающих репрезентативно большой объем полигона, поскольку результаты могут существенно отличаться в зависимости от со-

става, возраста, степени распада отходов и локальных условий в теле полигона. Тем не менее, могут быть сделаны выводы относительно условий и факторов, влияющих на газообразование на исследованных полигонах.

*Состав и количество отходов.* Состав ТБО может значительно отличаться в связи с различными социально-экономическими условиями в регионах, изменением состава отходов в период переходной экономики, неудовлетворительной стандартизацией, отчетностью и контролем в сфере утилизации отходов. Обычно для старых полигонов отсутствует достоверная информация о количестве и составе вывезенных отходов за период эксплуатации полигона, а заявленное операторами количество накопленных отходов может не соответствовать реальности. Полигоны могут принимать отходы промышленных предприятий или строительный мусор, что, вероятно, является объяснением повышенного содержания карбоната кальция в образцах полигона Б. Повышенное содержание инертных отходов, а также возможное присутствие в них ингибирующих веществ (тяжелых металлов и др.) может при-

вести к уменьшению потенциала генерации газа на полигоне, что и наблюдалось в экспериментальных исследованиях на полигонах А и Б.

*Аэробное разложение отходов.* Все исследованные полигоны имеют холмистую поверхность, низкую степень уплотнения отходов, для них характерно отсутствие регулярного послонного перекрытия в процессе эксплуатации. Все эти факторы способствуют проникновению атмосферного кислорода в тело полигона и аэробному разложению ОВ в процессе эксплуатации полигона.

*Влагосодержание.* Влажность отходов является одним из основных факторов, влияющим на скорость разложения отходов. Отсутствие регулярного покрытия и уплотнения создает условия, благоприятные для проникновения дождевых осадков в толщу полигона и ускоренного разложения органики. В условиях Украины часто наблюдается повышенный уровень фильтрата в теле полигона.

*Ингибирование.* Ингибирование может быть связано с повышенным содержанием определенных химических соединений, которые могут присутствовать на полигонах, принимающих промышленные отходы. Например, в нескольких образцах с полигона Б наблюдалось снижение газообразования инокулянта в присутствии образцов ТБО. Для подтверждения ингибирования требуются дополнительные исследования экотоксичности и содержания тяжелых металлов.

*Пожары.* Пожары приводят к выгоранию отходов и органического материала. По сообщениям операторов, они достаточно регулярно случаются на всех исследованных полигонах и наблюдались на двух полигонах во время проведения экспериментов. Поэтому данный факт необходимо учитывать при оценке потенциала газообразования, хотя он сложно поддается количественной оценке. В исследованных образцах с полигона А не наблюдалось явных признаков разрушения огнем, поэтому измеренный низкий газовый потенциал может быть скорее объяснен аэробным разложением отходов или более высоким начальным содержанием инертных материалов на этом

участке полигона, которое не было учтено при оценке состава отходов.

*Прогнозирование газообразования.* Потенциал газообразования для среднего состава ТБО в Украине составляет около 160 м<sup>3</sup> н.у. БГ/т отходов (ВВ). Как демонстрируют результаты исследования образцов, остаточный потенциал газообразования для одного из образцов составляет до 25 % начального значения, для четырех образцов – до 10...15 %, а для остальных десяти образцов менее 5 % начального значения. Наибольший потенциал БГ характерен для ТБО на глубине 3...6 м. На глубинах более 8 м потенциал газообразования относительно невелик. Полученные результаты свидетельствуют о наличии факторов, ускоряющих аэробное или анаэробное разложение органики в начале периода захоронения.

Модель МГЭИК и украинская модель, примененные для вычисления потенциала БГ, даже с применением рекомендуемых факторов дисконтирования для учета полуаэробных условий на полигонах и неточностей моделирования, в 2...5 раз завышают оценку остаточного потенциала газообразования для исследованного полигона по сравнению с данными лабораторных экспериментов. Данные насосного теста были в 1,8...2,5 раза выше, чем фактический сбор БГ во время эксплуатации промышленной системы сбора БГ. Расхождение, по-видимому, связано с гетерогенностью тела полигона. Можно сделать вывод, что потенциал метана на старых полигонах специфичен для условий конкретного полигона и зависит от состава отходов и еще более от эксплуатационной практики. Среди факторов, повышающих неопределенность оценки выхода БГ и возможность его сбора: низкая и неравномерная степень уплотнения, отсутствие изоляции дна и поверхности, отсутствие промежуточной пересыпки отходов, наличие возгораний. Наличие этих факторов приводит к частичному аэробному разложению или выгоранию отходов, а также к возможному ускорению разложения отходов в условиях повышенной влажности, связанной с инфиль-

трацией осадков и накоплением фильтрата в теле полигона.

Для уточнения потенциала газообразования необходимо проводить обследование и экспериментальные измерения на конкретном полигоне, к тому же на различных его участках. Необходимо обратить внимание на уточнение состава отходов и более широкое применение различных взаимодополняющих полевых и лабораторных методов исследования (исследование образцов отходов, тестовые откочки БГ, поверхностные измерения эмиссии БГ и др.) для получения информации об условиях в теле полигона и потенциале газообразования отходов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Stege A.G.* Steps towards initiating LFG utilization projects in developing countries – planning process, LFG models, and managing project expectations. // Proceedings of Methane to Markets Partnership Expo, Delhi, India. – 2010. Access mode: [http://www.globalmethane.org/expo\\_india10/docs/postexpo/landfill\\_stege.pdf](http://www.globalmethane.org/expo_india10/docs/postexpo/landfill_stege.pdf).
2. *Coops O., Luning L., Oonk H., Weenk A.* Validation of landfill gas formation models // Proceedings from Sardinia 1995 Fifth International Landfill Symposium, Cossu/Stegmann (Eds.), CISA publisher. – 1995. – P. 635–746.
3. *Methodological tool* «Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site» (Version 05.1.0) // UNFCCC CDM Executive Board, EB 61 Report, Annex 10. – 2011. – P.1-9. Access mode: <http://cdm.unfccc.int>.
4. *Скрипник А.П.* Анализ морфологического состава твердых бытовых отходов Украи-

ны как составляющая подхода к решению проблемы отходов // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2007. – вип. 4. – С. 78–86.

5. *Ukraine National Municipal Solid Waste Management Strategy: Existing situation and strategic issues report* / [DANCEE]. – Kiev: COWI, 2004. – 204 p.

6. *Improvement of Solid Domestic Waste Management in Donetsk Oblast of Ukraine* / [Тасис]. – Донецк: Тасис. 2004. – 291 с.

7. *User's Manual Ukraine Landfill Gas Model (Version 1.0)* // Report prepared on behalf of Landfill Methane Outreach Program of U.S. Environmental Protection Agency. – 2009. Access mode: <http://www.epa.gov/lmop/international/tools.html#a07>.

8. *Heerenklage, J., Stegmann, R.* Analytical Methods for the Determination of the Biological Stability of Waste Samples // Proceedings from Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cossu/Stegmann (Eds.), CISA publisher. – 2005. – P. 867–868.

9. *Kelly R.J., Shearer B. D., Kim J., Goldsmith C.D., Hater G.R., Novak J.T.* Relationships between analytical methods utilized as tools in the evaluation of landfill waste stability // Waste Management. – 2006. – Vol. 26. – P. 1349–1356

10. *Zach A., Widerin M., Binner E., Lechner P.* Auswahl und Anwendbarkeit von Parametern zur Charakterisierung der Endprodukte aus mechanisch-biologisch Restmuellbehandlungsverfahren. // Schriftenreihe 'Abfallwirtschaft' des Bundesministeriums fuer Umwelt, Jugend & Familie, Wien. – 1998. – Sektion III, Band 9.

Получено 11.07.2012 г.