

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ. ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 504.064.47

Н.Н. Слюсарь, Ю.М. Загорская, Е.Б. Кроха

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ОБЗОР БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ОТХОДОВ В МАССИВЕ ПОЛИГОНА ТБО

С целью разработки комплексного подхода в области оценки, прогноза и управления газовыми эмиссиями полигона на протяжении его жизненного цикла проведен обзор биологических методов оценки стабильности отходов в массиве. Среди биологических методов выделена группа аэробных и анаэробных методов, которые измеряют респирационную активность и потенциал газообразования отходов. Отмечены сильные и слабые стороны рассмотренных методов.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, полигон, стабильность отходов, оценка стабильности, респирационная активность, потенциал газообразования.

В настоящее время оценка негативного влияния полигона твердых бытовых отходов (ТБО) на атмосферный воздух основывается на количественных и качественных характеристиках газовых эмиссий, которые получают посредством полевых газохимических исследований. Прогноз периода и объема выхода биогаза определяется расчетным методом на основе математического моделирования. Параметры моделей уточняются на основании проектных данных полигона при использовании результатов полевых газохимических исследований.

Кратковременные полевые газохимические исследования дают оценку выхода биогаза на текущий момент времени проводимых полевых исследовательских работ и не содержат ин-

формации о величине газовых эмиссий в будущем, поскольку результаты указанных исследований зависят от многих факторов: сезона года, времени суток, количества осадков, температуры окружающей среды; атмосферного давления, скорости ветра [1].

Более точные данные о прогнозируемой величине газовых эмиссий могут быть получены на основании натуральных исследований состояния стабильности отходов в массиве полигона ТБО. Под стабильностью отходов подразумевается стадия процесса их биодegradации, при которой уровень микробной активности замедлился и не будет ускорен в случаях изменений условий среды [2].

Состояние стабильности отходов может быть определено при помощи биологических методов, которые дают информацию о текущей микробиологической активности в аэробных условиях и газогенерирующем потенциале в анаэробных условиях.

Данные методы были созданы в первую очередь для оценки стабильности отходов, прошедших механобиологическую обработку. Практика механобиологической обработки отходов наиболее распространена в таких европейских странах, как Германия, Австрия и Швейцария.

Цель механобиологической обработки отходов посредством механических (сортировка, резка, дробление) и биологических процессов (аэробный – компостирование, анаэробный – сбраживание) – достигнуть снижения массы и объема отходов, поступающих на полигоны ТБО, а также минимизировать их воздействие на окружающую среду, т.е. обеспечить минимальный уровень эмиссии биогаза и количества фильтрата [1]. Есть опыт применения указанных методов при оценке состояния стабильности отходов в массиве старых свалок [4].

Общая характеристика биологических методов. Биологические методы основываются на инкубировании органических отходов в присутствии микроорганизмов, которые используют органическое вещество, потребляя его в качестве субстрата для их роста. Испытания можно проводить в анаэробных (метаногенных) или аэробных условиях. Контроль процесса минерализации органических веществ микроорганизмами осуществляется посредством измерения количества потребляемого O_2 или продуцируемого CO_2 при аэробном процессе и объема генерируемого газа (основные компоненты CH_4 и CO_2) при анаэробных условиях.

Посредством биологических методов оценивается состояние стабильности отходов, состояние которое неизменно при различных условиях среды. В связи с этим в ходе проведения анализа все факторы должны поддерживаться в оптимальном диапазоне микробиологической активности. На микробиологическую активность оказывают влияние: условия среды (рН, температура, влажность, ионная сила), наличие питательных веществ (N, P, K, S, микроэлементы, O₂ для аэробного метода), размер частиц отходов, концентрация ингибирующих веществ. С уменьшением размера фракции отходов увеличивается микробиологическая активность по причине увеличения площади, доступной для микроорганизмов. Биологические методы неприменимы при высокой концентрации токсических веществ, которые оказывают ингибирующее действие на микробиологические процессы [4].

В качестве показателя оценки микробиологической активности (стабильности отходов) используют респираторную активность (аэробные условия) или потенциал газообразования (анаэробные условия).

Методы оценки респираторной активности отходов.

Величина респираторной активности микроорганизмов на субстрате отходов находится в прямо пропорциональной зависимости от содержания в них биоразлагаемых компонентов. На практике наиболее распространено применение показателя респираторной активности – АТ4, определение которого осуществляется в течение 4 дней.

Значения респираторной активности нестабилизированных отходов могут изменяться в диапазоне от 30 до 50 мгО₂/г сухого вещества [5], тогда как требования к стабильному состоянию отходов, разрешенных к захоронению на полигоне ТБО в Германии – АТ4 < 5 мгО₂/г сухого вещества [6], на территории Австрии – АТ4 < 7 мгО₂/г сухого вещества [4].

Существует несколько основных групп методов оценки респираторной активности, которые различаются по способу контроля процесса и выражения результатов: метод статического индекса дыхания (SRI), метод динамического индекса дыхания (DRI) и удельной скорости поглощения кислорода в жидкой среде (SROU).

Метод статического индекса дыхания осуществляется в изолированной системе, в которую помещен исследуемый

твердый образец отходов. Метод основывается на изменении концентрации O_2 в воздушном пространстве изолированной системы в ходе эксперимента. Изменение концентрации O_2 отслеживается по данным понижения давления внутри замкнутой системы, которое происходит в результате потребления кислорода микроорганизмами, и адсорбции щелочной ловушкой образуемого ими CO_2 .

При методе динамического индекса дыхания твердый анализируемый образец отходов помещается в открытую, не изолированную систему. Аппаратурное оформление метода обеспечивает поступление потока воздуха в систему и прохождение его через анализируемый образец отходов. Оценка респирационной активности осуществляется на основании данных изменений концентраций O_2 (потребление) или CO_2 (генерация) во входящем и выходящем потоке воздуха.

Метод удельной скорости поглощения кислорода в жидкой среде основан на измерении биологического потребления кислорода (БПК) в сточных водах. Метод включает в себя гомогенизацию отходов в водной суспензии и контроль убывания растворенного кислорода в жидкости с помощью датчика растворенного кислорода. Поскольку потребность в кислороде окислительных процессов отходов выше, чем содержание растворенного кислорода в суспензии, то осуществляется периодическое барботирование с целью насыщения кислородом водной суспензии [7].

На основании проведенного обзора работ [4, 8] можно сделать вывод, что метод динамического индекса дыхания показывает более высокие результаты респирационной активности, чем метод статического индекса дыхания, поскольку в первом случае осуществляется постоянный доступ свежего потока воздуха, скорость которого является важной переменной микробиологической активности, которая увеличивается с увеличением степени аэрации. Метод удельной скорости поглощения кислорода осуществляется в жидкой среде, отходы находятся в размоченном состоянии с растворенными питательными веществами, что способствует обеспечению наиболее оптимальных условий для развития микроорганизмов [7]. Недостаток данного метода в том, что в анализе используется небольшое количество образца отходов массой до 8 г (влажный вес), тогда как в методах SRI, DRI – 30–50 г, что может отрицательно повлиять на воспроизводимость результатов анализа гетерогенной смеси отходов.

Как уже было отмечено выше, респирационную активность можно оценить по потреблению O_2 или по продуцированию CO_2 . Потребление кислорода является прямым измерением аэробного дыхания, но необходимо учитывать, что расход O_2 может также осуществляться и на химические реакции, такие как окисление восстановленных соединений, например сульфидов. Оценка респирационной активности по образованию CO_2 является прямым показателем минерализации органических веществ, необходимо принимать во внимание, что CO_2 также будет образовываться при установлении анаэробных условий в системе или при разложении карбонатов в кислой среде.

Результаты респирационной активности отходов выражаются в суммарном потреблении O_2 мг/г сухого вещества за период активной фазы проведения эксперимента, без учета значений, полученных в период лаг-фазы. Лаг-фазой считается временной интервал между началом измерения и началом экспоненциального роста микробной активности. Устанавливается окончание периода лаг-фазы на момент, когда среднее значение потребления O_2 за 3 ч составляет 25 % от среднего максимального потребления O_2 за 3 ч [3].

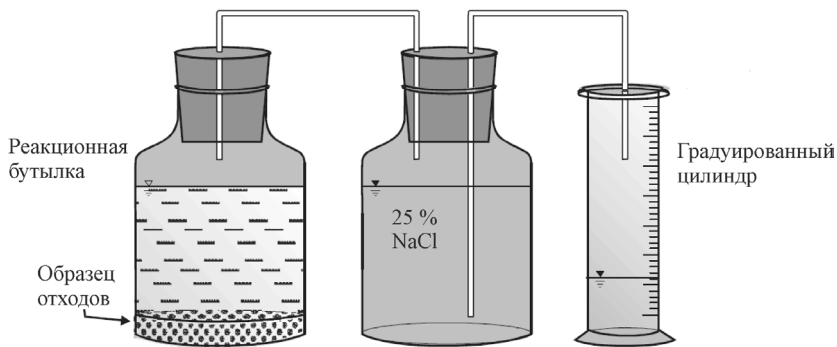
Методы оценки потенциала газообразования отходов.

Данная группа методов измеряет способность отходов к биологическому разложению в анаэробных условиях с использованием метаногенных реакторов. Способность отходов к биологическому разложению выражается через объем выделяемого биогаза или метана. Поскольку небольшое количество (около 10 %) деградированного органического углерода отходов переходит в микробную массу [7], то оценка генерируемого объема биогаза обеспечивает точное измерение количества деградации (минерализация) отходов. Таким образом, чем больше объем образуемого биогаза, тем выше способность отходов к биодеградации и тем ниже может быть оценено их состояние стабильности.

Стабильными считаются отходы с потенциалом газообразования $GB21 < 20$ л/кг сухого вещества на территории Германии и Австрии [4, 6], тогда как потенциал газообразования нестабилизированных отходов может составлять 134–233 л/кг сухого вещества [5] в зависимости от исходного морфологического состава отходов.

Существуют несколько методов для оценки потенциала газообразования отходов – биохимический потенциал метанообразования (BMP), ферментационный (GB21) или инкубационный (GS21, GS90) методы оценки газообразования, среди которых наибольшее распространение получил инкубационный и ферментационный.

Ферментационный метод осуществляется путем помещения анализируемого образца отходов массой 50 г (сухого вещества) в реакционный сосуд с добавлением 1 л воды и инокулянта. Образующий газ собирается в стеклянный сосуд с 25%-м раствором хлорида натрия (рис. 1), высокая концентрация солей в растворе необходима для понижения растворения газов.



Объем образуемого газа замеряется посредством мерного цилиндра, в который поступает соленый раствор, вытесняемый биогазом.

Потенциал газообразования отходов может быть оценен в ходе инкубационного метода. Насыщенный влагой образец отходов массой 800–1500 г (сухого вещества) инкубируют в стеклянном реакторе при анаэробных условиях и 40 °С [9]. Объем генерируемого газа измеряют с помощью газоизмерительной бюретки – эвдиометра (рис. 2).

Среди анаэробных методов определения стабильности отходов наиболее распространен в Австрии метод GS21, тогда как в Германии нормативно предписано применение метода GB21. Последний метод имеет более простую конструкцию экспериментальной установки, меньший период лаг-фазы. Сокращение периода лаг-фазы связано с повышением микробиологической

активности по причине понижения ингибирующего действия токсичных веществ из-за снижения их концентрации при добавлении воды, также стоит отметить, что повышается доступность питательных веществ в растворимом состоянии.

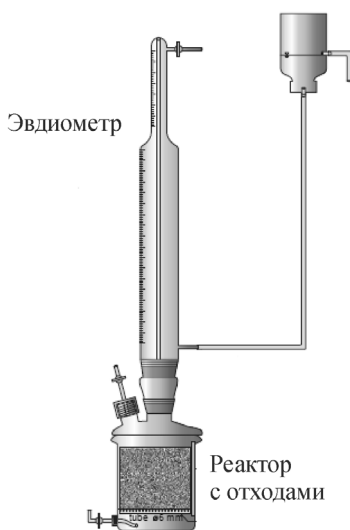


Рис. 2. Аппаратурное оформление метода GS21 [4]

Инкубационный метод GB21 предполагает анализ большей массы образца (800–1500 г по сухому веществу), что обеспечивает высокую воспроизводимость результатов при анализе гетерогенной смеси отходов. Может наблюдаться более длительный период лаг-фазы по причине ингибирующего действия токсических веществ [4].

Посредством методов GS21, GB21 оценивается степень стабильности отходов, но полный потенциал газообразования не всегда возможно оценить в период эксперимента ввиду короткого срока его проведения – 21 день.

На результаты биологических методов влияет множество факторов, таких как: преаэрационный период подготовки отходов к анализу (АТ4), степень измельчения отходов, наличие питательных веществ, влажность, температура, давление, срок после отбора пробы и условия хранения. В связи с этим необходимо строго соблюдать аналогичные условия проведения экспериментов с целью получения сопоставимых результатов [4].

Физико-химические методы оценки стабильности отходов. В качестве параметров оценки стабильности отходов, по данным ряда исследовательских работ [4, 7, 10, 11], возможно применение следующих химических показателей: содержание аммонийного азота, нитратов, целлюлозы, лигнина, растворенного органического углерода, общего органического углерода, гуминовых и фульвокислот, БПК и ХПК.

Имеется небольшой опыт применения методов спектроскопического и термического анализа для оценки стабилизации отходов. Термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия и ИК-фурье-спектроскопия оцениваются как мето-

ды быстрой оценки состояния стабильности отходов, которые определяют термические и химические свойства материалов [12]. Указанные методы имеют большие перспективы к применению в области оценки стабильности отходов и в настоящее время находятся в стадии разработки и отработки на практике [2, 12, 13].

В ходе проведенного анализа биологических методов оценки стабильности отходов можно сделать вывод, что среди аэробных методов оценки стабильности отходов наиболее высокие результаты респирационной активности отходов могут быть получены при использовании метода SROU, который осуществляется в жидкой среде. Недостатком данного метода является небольшая масса анализируемого образца отходов до 8 г (влажный вес).

Наиболее предпочтительным методом оценки респирационной активности отходов является метод DRI. При осуществлении метода динамического индекса дыхания поддерживается постоянный приток свежего воздуха, что ведет к высокой микробиологической активности и к большим значениям респирационной активности, чем при осуществлении метода статического индекса дыхания.

С целью определения потенциала газообразования отходов наиболее высокие результаты могут быть получены в ходе выполнения ферментационного метода GB21, поскольку он осуществляется в жидкой среде. Существенным недостатком метода GB21, так же как и в методе SROU, является относительно небольшая масса анализируемого образца отходов – 50 г (сухого веса), что понижает возможность получения репрезентативной выборки образца отходов. Таким образом, наиболее предпочтительным методом для определения потенциала газообразования отходов является метод GS21.

Биологические методы оцениваются как наиболее сложные, дорогостоящие, трудоемкие и длительные, которые обеспечивают прямое измерение биологического разложения отходов. По этой причине целесообразно в дальнейшем рассмотреть возможность применения физико-химических методов, которые характеризуются как более простые и быстрые.

Библиографический список

1. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? / K. Spokas, J. Bogner, J.P. Chanton, M. Morcet, C. Aran, C. Graff, Y.M. Golvan, I. Hebe // *Waste Management*. – 2006. – P. 516–525.
2. Smidt E., Böhm K., Schwanninger M. The Application of FT-IR Spectroscopy in Waste Management // *Fourier Transforms – New Analytical Approaches and FTIR Strategies*. InTech, 2011. – URL: <http://www.intechopen.com/books/fourier-transforms-new-analytical-approaches-and-ftir-strategies/the-application-of-ft-ir-spectroscopy-in-waste-management>.
3. Protocol for the Evaluation of Biodegradable Municipal Waste Sent to Landfill // *Environmental Protection Agency (EPA)*. – 2011. – Vol. 41.
4. Labor test methods characterizing the biological reactivity of wastes / E. Binner, P. Lechner, M. Widerin, A. Zach // *6th International Landfill Symposium*. – Sardinia, 1997. – P. 1–12.
5. Soyez K., Plickert S. Mechanical-Biological Pre-Treatment of Waste – State of the Art and Potentials of Biotechnology // *Acta Biotechnologica*. – 2002. – P. 271–284.
6. German Federal Minister for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety: Ordinance on Environmentally Compatible Storage of Waste from Human Settlements and on Biological Waste-Treatment Facilities. – Berlin, 2001.
7. Environment agency review of methods for determining organic waste biodegradability for landfill and municipal waste diversion / A. Godley, K. Lewin, A. Graham, R. Smith // *Proc. 8th European Biosolids and Organic Residuals Conference*. – Wakefield, UK, 2003. – Vol. 2. – P. 1–14.
8. Cooper B.J. Stability (Biodegradability) // *Report Horizontal – 7 WP4*. – 2004.
9. ÖNORM S 2027-2 -Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Behandlung – Teil 2: Stabilitätsparameter – Gasspendensumme im Inkubationstest (GS21).
10. Final report. BSI PAS 100 Update // *Review of Stability Testing. WRAP*. – 2009.
11. Relationships between analytical methods utilized as tools in the evaluation of landfill waste stability / J. Kelly, D. Shearer, J. Kim, D. Goldsmith, R. Hater, T. Novak // *Waste Management*. – 2006. – P. 1349–1356.
12. Пухнюк А.Ю., Матвеев А.Ю., Хубер-Хумер М. Применение спектральных и термических методов анализа для эколого-энергетической оценки полигонов твердых бытовых отходов // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. – 2012. – № 4. – С. 49–59.
13. Smidt E., Böhm K., Tintner J. Monitoring and assessment of landfills using simultaneous thermal analysis. *Sustain* // *Environ.* – 2011. – P. 247–252.

References

1. Spokas K., Bogner J., Chanton J.P., Morcet M., Aran C., Graff C., Golvan Y.M., Hebe I. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 2006, pp. 516–525.
2. Smidt E., Böhm K., Schwanninger M. The Application of FT-IR Spectroscopy in Waste Management. *Fourier Transforms – New Analytical Approaches and FTIR Strategies*. InTech, 2011, available at: <http://www.intechopen.com/books/fourier-transforms-new-analytical-approaches-and-ftir-strategies/the-application-of-ft-ir-spectroscopy-in-waste-management>.
3. Protocol for the Evaluation of Biodegradable Municipal Waste Sent to Landfill. *Environmental Protection Agency (EPA)*, 2011, vol. 41.
4. Binner E., Lechner P., Widerin M., Zach A. Labor test methods characterizing the biological reactivity of wastes. *6th International Landfill Symposium*. Sardinia, 1997, pp. 1–12.
5. Soyez K., Plickert S. Mechanical-Biological Pre-Treatment of Waste – State of the Art and Potentials of Biotechnology. *Acta Biotechnologica*, 2002, pp. 271–284.
6. German Federal Minister for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety: Ordinance on Environmentally Compatible Storage of Waste from Human Settlements and on Biological Waste-Treatment Facilities. Berlin, February 20th, 2001.
7. Godley A., Lewin K., Graham A., Smith R. Environment agency review of methods for determining organic waste biodegradability for landfill and municipal waste diversion. *Proc. 8th European Biosolids and Organic Residuals Conference, Wakefield, UK*, 2003, vol. 2, pp. 1–14.
8. Cooper B.J. Stability (Biodegradability). *Report Horizontal – 7 WP4*, 2004.
9. ÖNORM S 2027-2 – Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Behandlung – Teil 2: Stabilitätsparameter – Gasspendensumme im Inkubationstest (GS21)
10. Final report. BSI PAS 100 Update. *Review of Stability Testing. WRAP*. 2009.
11. Kelly J., Shearer D., Kim J., Goldsmith D., Hater R., Novak T. Relationships between analytical methods utilized as tools in the evaluation of landfill waste stability. *Waste Management*, 2006, pp. 1349–1356.
12. Puhnyuk A.Y., Matveev A., Huber-Humer M. Primenenie spektralnykh i termicheskikh metodov analiza dlya ekologo-energeticheskoy otsenki poligonov tverdykh bytovykh otkhodov [Application of spectral and thermal methods of analysis for environmental and energy assessment of solid waste landfills]. *Power Technologies and Resources*, 2012, no. 4, pp. 49–59.
13. Smidt E., Böhm K., Tintner J. Monitoring and assessment of landfills using simultaneous thermal analysis. *Sustain. Environ*, 2011, pp. 247–252.

Получено 20.05.2013

N. Sliusar, Y. Zagorskaya, E. Kroha

REVIEW OF BIOLOGICAL ASSESSMENT METHODS OF WASTE STABILIZATION IN THE LANDFILL BODY

In order to develop a comprehensive approach assessment, forecasting and control emissions of pollutants in the landfill during its life cycle, a review of biological methods to assess the stability of waste on the basis of European experience. Among the biological methods highlighted aerobic group, which measure respiration waste activity and a group of anaerobic methods used to assess the potential gas production waste. A brief description of methods and assessment of their strengths and weaknesses of the application.

Keywords: municipal solid waste, landfill, waste stabilization, evaluation of stabilization, respiratsionnaya activity, potential gas production.

Слюсарь Наталья Николаевна (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: slyusar@eco.pstu.ac.ru).

Загорская Юлия Михайловна (Пермь, Россия) – ассистент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: makarova_u85@mail.ru).

Кроха Екатерина Богдановна (Пермь, Россия) – студентка кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: krohens@mail.ru).

Slusar Natalia (Perm, Russia) – Ph.D. in Technics, Associate Professor of Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: slyusar@eco.pstu.ac.ru).

Zagorskaya Yuliya (Perm, Russia) – assistant of Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: makarova_u85@mail.ru).

Kroha Ekaterina (Perm, Russia) – student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: krohens@mail.ru).