

УДК 628.315.1, 351.777.613

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЛИГОНА ТБО

Ширкин Л.А., Селиванов О.Г., Ильина М.Е., Трифонова Т.А.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, e-mail: shirkin@mail.ru

Целью исследования явилась оценка устойчивости природно-технической системы полигона ТБО посредством разработки имитационной модели анаэробного биореактора полигона ТБО и численного моделирования процессов формирования, транспорта и накопления загрязнённого фильтрата при инфильтрации рассолов жидких отходов в целях геоэкологического обоснования безопасного захоронения «хвостов» (неутилизируемых высококонцентрированных жидких отходов) на полигоне. Объектом моделирования является тело полигона твердых бытовых отходов. Апробация модели проводилась на примере Марьинского полигона ТБО (Владимирская область). В качестве предмета моделирования и исследования рассматриваются процессы формирования и перемещения загрязнённого фильтрата при инфильтрации концентрата в толще полигона ТБО от поверхностных слоев к дренажной системе. На примере полигона ТБО даны прогнозные оценки общей минерализации фильтрата в условиях контролируемой утилизации концентрата в тело полигона. В результате моделирования получены решения и новые данные: 1) о времени, за которое будет зафиксирован максимальный рост концентрации солей в фильтрате дренажной системы после начала инфильтрации концентрата в тело полигона; 2) о предельных объемах (количествах) захоронения неутилизируемых жидких отходов, которые может принять тело полигона; 3) об условиях прогнозирования накопления солей в теле полигона и в фильтрате.

Ключевые слова: анаэробный биореактор, полигон ТБО, фильтрат, минерализация, миграция, моделирование, безопасное захоронение

ESTIMATION OF STABILITY OF NATURAL-TECHNICAL SYSTEM OF MSW DISPOSAL

Shirkin L.A., Selivanov O.G., Ilna M.E., Trifonova T.A.

Vladimir State University by N.G. and A.G. Stoletovs, Vladimir, e-mail: shirkin@mail.ru

The purpose of this study was to evaluate the sustainability of natural-technical system of solid waste landfill through the development of simulation models of anaerobic bioreactor and numerical simulation of processes of formation, transport and accumulation of contaminated leachate by infiltration of liquid brine waste for geo-environmental study for the safe disposal of tailings (non-recyclable, highly concentrated liquid waste) at the landfill. The simulation object is the body of the landfill. Aprrobation of the model was conducted on the example of the Maryinsky landfill (Vladimir region). The subject of modeling and research focuses on the processes of formation and movement of contaminated leachate by infiltration of concentrate in the thickness of the landfill from surface layers to the drainage system. The example of landfill predictive estimates of total mineralization of leachate in the conditions of controlled disposal of the concentrate into the landfill. The result of simulation of the obtained solutions and the new data: 1) on-time which will be recorded the maximum increase in the concentration of salts in the filtrate of the drainage system after the start of infiltration of the concentrate into the body of the landfill; 2) limit the volumes (quantities) of disposal of non-recyclable liquid wastes that are accepted by the landfill; 3) the conditions predict salt accumulation in the body of the landfill and in the leachate.

Keywords: anaerobic bioreactor, MSW disposal, the filtrate, mineralization, migration, modeling, safe disposal

На сегодняшний день моделей, описывающих процессы формирования, транспорта и накопления загрязнённого фильтрата и позволяющих прогнозировать состав фильтрационных вод и биodeградацию органического вещества в условиях анаэробного реактора полигона ТБО, не существует. Одна из причин – это непостоянство его состава, который определяется морфологическим составом ТБО, временем нахождения в теле полигона, а также степенью разбавления атмосферными осадками [5, 7].

Современный полигон ТБО рассматривается как анаэробный биореактор, что требует создания его современной математической модели [1]. Для этого необ-

ходимо учитывать сложные физические, физико-химические и биологические процессы, протекающие в толще отходов [6]. Расходы по утилизации концентрата еще в недалеком прошлом оценивались как довольно дорогие. В настоящее время в качестве наиболее перспективного способа обращения с концентратами рассматривается их контролируемая утилизация в теле самого полигона, которая является не только самым дешевым способом утилизации концентрата, но, как предполагается, улучшает биохимические процессы в органических остатках и ускоряет процессы иммобилизации и деструктуризации органических соединений [2, 5].

Целью исследования явилась оценка устойчивости природно-технической системы полигона ТБО посредством разработки имитационной модели анаэробного биореактора полигона ТБО и численного моделирования процессов формирования, транспорта и накопления загрязнённого фильтрата при инфильтрации рассолов жидких отходов в целях геоэкологического обоснования безопасного захоронения «хвостов» (неутилизируемых высококонцентрированных жидких отходов) на полигоне.

Материалы и методы исследования

Объектом моделирования является тело полигона твердых бытовых отходов. Апробация модели проводилась на примере Марьинского полигона ТБО (Владимирская область) (рис. 1).

В качестве предмета моделирования и исследования рассматриваются процессы формирования и перемещения загрязнённого фильтрата при ин-

фильтрации концентрата в толще полигона ТБО от поверхностных слоев к дренажной системе. Так как фильтрат представляет собой минерализованный раствор с общим солесодержанием до 14–17 г/дм³, а концентрат, вводимый в тело полигона, характеризуется значительно большей минерализацией при незначительном содержании растворенных органических соединений, то в качестве выходных параметров разрабатываемой модели выступают показатели общей минерализации в фильтрате.

Анализ процессов в теле полигона, изложенный в ряде публикаций, позволил составить кинетическую схему биодеструкции отходов и формирования фильтрата в теле полигона [3]. Процесс формирования минерализации фильтрата в теле полигона можно представить в виде блок-схемы (рис. 2). Для целей математического моделирования биодеструкцию отходов в теле полигона упрощенно можно представить как процесс, протекающий в две стадии:

- 1) растворение, гидролиз органических соединений, ацидогенез;
- 2) метаногенез [1, 4].



Рис. 1. Слой отходов на полигоне ТБО «Марьинский»

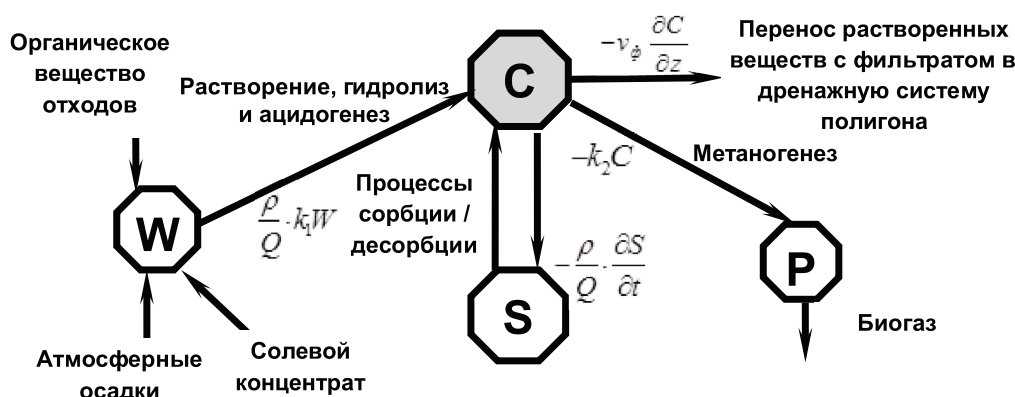


Рис. 2. Упрощенная кинетическая модель биодеструкции отходов и формирования фильтрата в теле полигона:

C – растворенные вещества в жидкой фазе фильтрата, содержащиеся в ионной и коллоидной форме; *S* – растворенные вещества в сорбированном состоянии в твердой фазе отходов; *W* – органическое вещество, доступное для биологической деструкции и содержащееся в твердой фазе отходов; *P* – продукты метаногенеза

Важной биохимической особенностью биодеструкции отходов является поступление в фильтрат на всех стадиях биодеструкции карбоновых кислот и их солей, в первую очередь уксусной кислоты, которые в значительной степени определяют физико-химические свойства фильтрата [1, 3, 6].

Процесс формирования минерализации фильтрата в теле полигона можно описать системой дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных, каждое уравнение которой описывает свой процесс:

1) процессы формирования минерализации фильтрата или суммарной концентрации растворенных веществ;

2) кинетика процессов механической, физико-химической и биологической сорбции/десорбции в отношении растворенных компонентов фильтрата и их перераспределение между жидкой и твердой фазами в теле полигона;

в отсутствии введения концентрата в тело полигона. Результаты численного эксперимента показали, что для Марьинского полигона ТБО:

1) характерна нелинейная динамика минерализации фильтрата, асимметричные куполообразные кривые и поверхности (рис. 3);

2) ожидаемое среднее время пребывания солей вводимого концентрата в массиве отходов составляет не менее 84 сут;

3) ожидаемые максимальные значения минерализации фильтрата оцениваются величиной 13000 мг/л;

4) на второй год эксплуатации полигона ТБО расчетная минерализация фильтрата, поступающего в дренажную систему, составила 7800 мг/л.

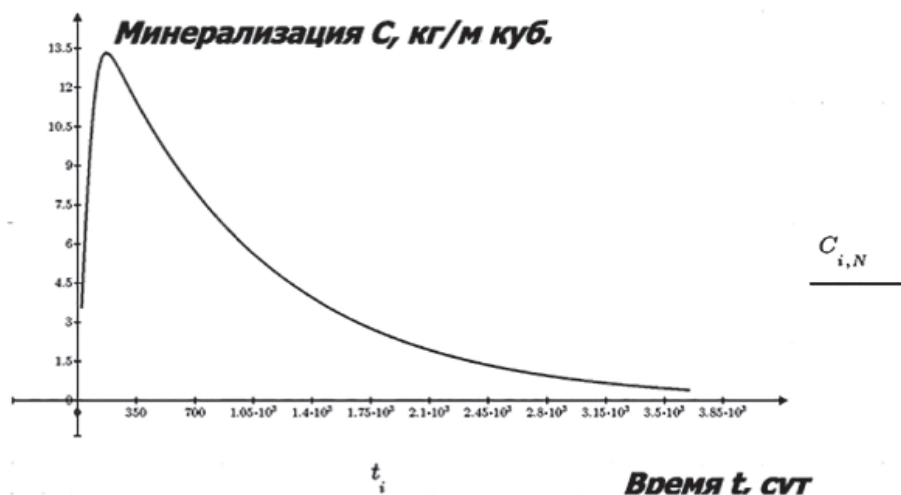


Рис. 3. Динамика минерализации фильтрата в дренажной системе без введения концентрата в тело полигона

3) кинетика изменения содержания в твердой фазе отходов органического вещества, доступного для биологической деструкции.

Результаты исследования и их обсуждение

Фоновая минерализация фильтрата, т.е. концентрация солей до введения концентрата в тело полигона, определяется как экспериментально (7800 мг/л), так и по результатам моделирования.

Предельно допустимая минерализация $C_{\text{ПДС}}$ концентрата, вводимого в тело полигона ТБО, согласно расчетам, не должна превышать 122500 мг/л. Превышение этого уровня неизбежно приведет к прекращению биодegradации отходов в теле полигона, т.е. к ингибированию процессов метаногенеза, гидролиза и ацидогенеза.

Задачей 1-го этапа исследований явилась проверка адекватности прогнозных оценок общей минерализации фильтрата

Следствиями полученных результатов являются следующие заключения:

1) модель учитывает общую зависимость состава фильтрата от времени нахождения ТБО в массиве складированных отходов и увлажнения;

2) при составлении точных прогнозов по количественным характеристикам фильтрата необходим учет количества атмосферных осадков за предшествующий трехмесячный период;

3) ожидаемые предельные значения ХПК фильтрата, поступающего из дренажной системы, находятся в районе 2600 мг O_2 /л;

4) расчетная минерализация фильтрата в целом соответствует экспериментальным значениям, соответствующим 7600 мг/л.

Задача 2-го этапа — это составление прогнозных оценок общей минерализации фильтрата в условиях введения концентрата

в тело полигона. Вычислительный эксперимент проводился в 2 стадии:

1) получение прогнозных оценок в условиях контролируемого введения концентрата в тело Марьинского полигона при нагрузках, не достигающих предельно допустимых уровней;

2) получение прогнозных оценок в условиях контролируемого введения концентрата в тело Марьинского полигона при нагрузках, соответствующих предельно допустимым уровням.

На первой стадии в вычислениях задавались условия, имитирующие введение реального концентрата в тело Марьинского полигона, когда минерализация концентрата составляет 82 г/л, т.е. при нагрузках, не достигающих предельно допустимых уровней.

Вычисления подтвердили, что максимальные значения минерализации фильтрата (21,9 г/л) после начала введения концентрата не превысили прогнозируемых критических уровней. Интервал времени, в течение которого происходит рост минерализации фильтрата в дренажной системе после начала введения концентрата до максимальных значений (21,9 г/л), оценивается величиной 219 сут.

Общий ход кривой минерализации фильтрата имеет ожидаемый нелинейный ступенчатый характер, после достижения максимума минерализация фильтрата постепенно снижается при непрекращающемся введении жидких отходов в тело полигона (рис. 4).

Подавление биодеструкции отходов и нарушение биологических процессов, формирующих состав фильтрата в теле полигона, рассматривается как неблагоприятный сценарий развития событий, реализующихся вследствие ингибирования высокоминерализованным раствором при общей минерализации свыше 122,5 г/л.

Полигон ТБО рассматривается как прочная система, анаэробный биореактор непрерывного действия. На завершающей стадии очистки фильтрата полигона ТБО в процессе обратноосмотического разделения исходный поток делится на две части – пермеат (очищенную воду) и концентрат – поток, обогащенный солями и в дальнейшем требующий утилизации. Концентрат может быть признан пригодным для контролируемой утилизации в теле полигона ТБО, но способен оказывать как угнетающее, так и стимулирующее действие на микробиоту, подавляя или увеличивая скорость разложения отходов в теле полигона [1].

Подавление биодеструкции отходов и нарушение биологических процессов, формирующих состав фильтрата в теле полигона, рассматривается как неблагоприятный сценарий развития событий, реализующихся вследствие ингибирования высокоминерализованным раствором при общей минерализации свыше 122,5 г/л. Отсюда предельно допустимое количество солей (массовый расход солей в пересчете на сухую массу), допустимое для контролируемой утилизации в теле Марьинского

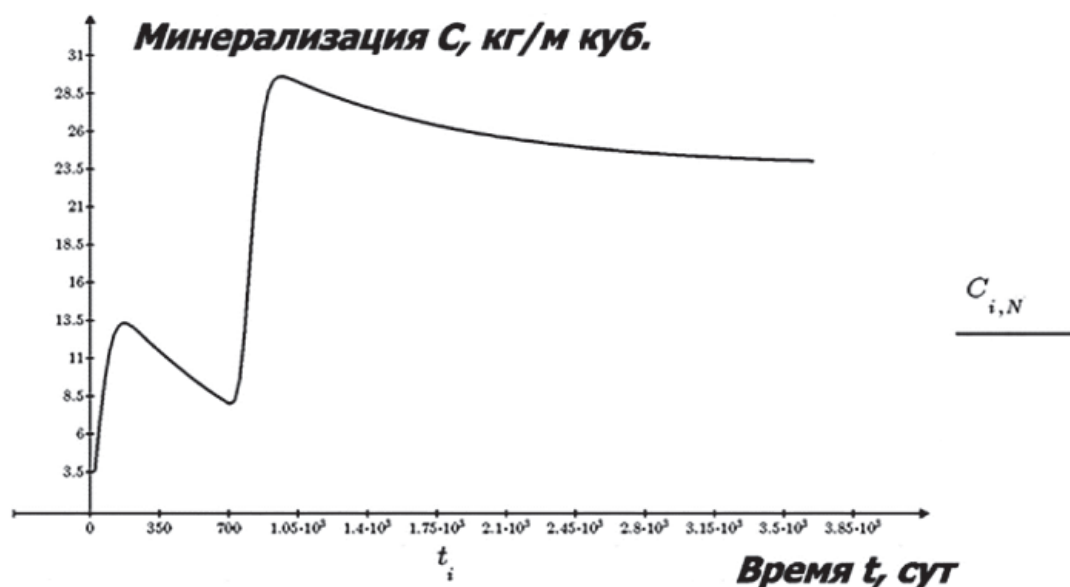


Рис. 4. Динамика минерализации фильтрата в дренажной системе в условиях введения концентрата в тело полигона при нагрузках, соответствующих предельно допустимым уровням

полигона ТБО, составляет 0,024 кг/(м²·сут) или 8,774 кг/(м²·год). Расчет предельно допустимого количества концентрата основан на оценке критической концентрации солей в фильтрате, при которой реализуется ингибирование гидролиза компонентов отходов в теле полигона ТБО, а также на ассимилирующей способности полигона ТБО.

Вычислительный эксперимент подтвердил прогнозные оценки максимальных уровней минерализации фильтрата в условиях, имитирующих введение реального концентрата в тело Марьинского полигона при общей минерализации 82 г/л. Концентрат пригоден для контролируемой утилизации в теле полигона ТБО. Предельно допустимое количество загрязняющих веществ (в пересчете на сухое вещество), которое ассимилируется в теле Марьинского полигона ТБО, может быть оценено величиной 5,85 кг/м².

Среди особенностей разработанной модели можно выделить:

1) достаточно полное отображение «глубинных» свойств и механизмов функционирования системы «твердая фаза отходов – фильтрат»;

2) учет большого числа переменных и параметров системы «твердая фаза отходов – фильтрат»;

3) имитация явлений различной (физической, химической и экологической) природы;

4) большинство коэффициентов модели имеют экологический (физический) смысл;

5) наглядность и экономичность модели;

6) модель построена с использованием как априорной информации, так и экспериментальных данных;

7) возможность изучения совокупности целостных характеристик системы «твердая фаза отходов – фильтрат» и использования в качестве средства системного экспериментирования для прогнозирования накопления солей в теле полигона;

8) модель учитывает закономерности изменения состава фильтрата от времени нахождения ТБО в теле полигона и улавливания;

9) в модели возможен учет сезонного хода минерализации фильтрата вследствие естественного и искусственного разбавления атмосферными осадками;

10) в условиях ограниченности данных для оценки химических, физико-химических и биологических коэффициентов в уравнениях точность модели является приемлемой, так как средняя

относительная ошибка (отклонение) не превышает 15 %;

11) модель позволяет оценивать предельно допустимое поступление жидких отходов для контролируемой утилизации в теле полигона.

Заключение

На примере Марьинского полигона ТБО (Владимирская область) даны прогнозные оценки общей минерализации фильтрата в условиях контролируемой утилизации концентрата в тело полигона.

1. Проведена оценка критического уровня минерализации фильтрата, предельно допустимой минерализации концентрата, предельно допустимого количества солей, подлежащего контролируемой утилизации в пересчете на сухую массу.

2. Разработанная математическая модель основана на кинетической схеме биодеструкции.

3. Установлено, что концентрат при общей минерализации до 122,5 г/л может быть использован для контролируемой утилизации в теле Марьинского полигона ТБО.

Анализ результатов моделирования прироста содержания солей показал, что совокупность гипотез, сформулированных на этапах концептуальной и математической постановки задачи, справедлива и достаточна для описания минерализации фильтрата в отсутствие введения концентрата в тело полигона, так как динамика минерализации фильтрата полностью соответствует теоретическим представлениям о биодеструкции отходов ТБО.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Договор от 12.02.2013 № 02.G25.31.0066).

Список литературы

1. Вавилин В.А. Математическое моделирование динамики сообществ анаэробных микроорганизмов // Математическое моделирование в экологии: материалы Нац. конф. с международным участием. (Пушино, 1–5 июня 2009 г.) – ИФХиБПП РАН, 2009. – С. 49–50.

2. Воронкова Т.В., Вайсман Я.И., Чудинов С.Ю. Рециркуляция фильтрата на полигонах захоронения твердых бытовых отходов // Вестник ПНИПУ. Урбанистика, – 2012. – № 3. – С. 83–91.

3. Костарев С.И., Файзрахманов Р.А., Серда Т.Г. Разработка модели анаэробного биореактора полигона твердых бытовых отходов // Экологические системы и приборы. – 2012. – № 9. – С. 46–52.

4. Королев С.А., Майков Д.В. Идентификация математической модели и исследование различных режимов метаногенеза в мезофильной среде // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. Т. 4. – № 1. – С. 131–141.

5. Трифонова Т.А., Селиванова Н.В., Ширкин Л.А., Селиванов О.Г., Ильина М.Е. Проблемы утилизации ТБО на полигонах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 3(2). – С. 885–887.

6. Christensen, T.H & Kjeldsen, P. Basic biochemical processes in landfills. In: Sanitary Landfilling: Process, Technology & environmental impact, ed. T.H. Christensen, R. Cossu & R. Stiegmann. – Academic Press, London, 1989. – P. 234.

7. Ehrig, H.-J. Quality and quantity of sanitary landfill leachate // In: Waste Management & Research. – 1983. – P. 53–68.

References

1. Vavilin V.A. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki soobshhestv anajerobnyh mikroorganizmov // Matematicheskoe modelirovanie v jekologii: materialy Nac. konf. s mezhdunarodnym uchastiem. (Pushhino, 1–5 ijunja 2009 g.). IFHIBPP RAN, 2009. pp. 49–50.

2. Voronkova T.V., Vajsman Ja.I., Chudinov S.Ju. Recirkuljacija filtrata na poligonah zahoronenija tverdyh bytovyh othodov // Vestnik PNIPU. Urbanistika, 2012. no. 3. pp. 83–91.

3. Kostarev S.I., Fajzrahmanov R.A., Sereda T.G. Razrabotka modeli anajerobnogo bioreaktora poligona tverdyh bytovyh othodov // Jekologicheskie sistemy i pribory. 2012. no. 9. pp. 46–52.

4. Korolev S.A., Majkov D.V. Identifikacija matematicheskoy modeli i issledovanie razlichnyh rezhimov metanogeneza

v mezofilnoj srede // Kompjuternye issledovanija i modelirovanie. 2012. T. 4. no. 1. pp. 131–141.

5. Trifonova T.A., Selivanova N.V., Shirkin L.A., Selivanov O.G., Ilina M.E. Problemy utilizacii TBO na poligonah // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2013. T. 15. no. 3(2). pp. 885–887.

6. Christensen, T.H & Kjeldsen, P. Basic biochemical processes in landfills. In: Sanitary Landfilling: Process, Technology & environmental impact, ed. T.H. Christensen, R. Cossu & R. Stiegmann. Academic Press, London, 1989. pp. 234.

7. Ehrig, H.-J. Quality and quantity of sanitary landfill leachate // In: Waste Management & Research. 1983. pp. 53–68.

Рецензенты:

Чухланов В.Ю., д.т.н., профессор кафедры химических технологий, Институт прикладной математики и информатики, био- и нанотехнологий, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир;

Малафеев С.И., д.т.н., профессор кафедры управления и информатики в технических и экономических системах, Институт инновационных технологий, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир.