

УДК 628.472.3.032:628.516

М.В. Ахмадиев, А.А. Чугайнова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОЧИЩЕННОЙ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОЙ ПОЧВЫ В КАЧЕСТВЕ МЕТАНОКСИДАЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ПОЛИГОНАХ ТКО

Статья посвящена проблеме образования и снижения эмиссий метана на постэксплуатационном этапе жизненного цикла полигона захоронения твердых коммунальных отходов (ТКО). Даная проблема особенно актуальна для России, в связи с тем что на полигонах ТКО осуществляют размещение всего потока коммунальных отходов, который в значительной степени содержит органическую фракцию. Размещение органической фракции отходов на полигоне ТКО в долгосрочной перспективе обеспечивает неконтролируемые эмиссии метана в окружающую среду. Речь идет как о закрытых (рекультивированных) полигонах ТКО, так и о действующих объектах размещения отходов. В статье представлен актуальный европейский опыт по снижению эмиссий метана, а также описаны возможные технические мероприятия по сокращению эмиссий метана и снижению негативного воздействия полигона ТКО на окружающую среду. Проведен обзор материалов, используемых для организации метаноксидационных экранов, а также варианты их конструктивной реализации (биофилтры, биопокрытия, биоокна). Оценены перспективы применения очищенной нефтезагрязненной почвы, содержащей высокую численность углеводородокисляющих микроорганизмов, в качестве материала для метаноксидационного экрана. Приведены результаты экспериментальных исследований образцов нефтезагрязненной почвы по физико-химическим, микробиологическим и санитарно-гигиеническим показателям. Предложены два конструктивных варианта организации метаноксидационного экрана полигона ТКО с использованием в качестве загрузки очищенной нефтезагрязненной почвы, а именно – биоокно и биопокрытие. На основании экспериментальных и литературных данных представлено обоснование отсутствия дополнительной нагрузки на окружающую среду при применении нефтезагрязненной почвы в качестве материала для метаноксидационного экрана полигона ТКО.

Ключевые слова: полигоны ТКО, рекультивационное покрытие, метан, метаноксидационный материал, парниковые газы, нефтезагрязненная почва, углеводородокисляющие микроорганизмы, биопокрытие, биоокно, биофилтр.

M.V. Akhmadiev, A.A. Chugainova

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

PERSPECTIVE OF USING OF CRUDE OIL CONTAMINATED SOIL AFTER REMEDIATION FOR METHANE OXIDATION MATERIAL IN LANDFILLING

The article is devoted to the problem of appearance and reducing of methane emissions from landfill of municipal solid waste after recultivation. This Problem is more important for Russia, because in landfills put all municipal waste which content many organic fraction. Landfilling of organic waste fraction in the long term

provide uncontrolled emission of methane in environment. The article presents the current European experience in reducing methane emissions and describes the possible technical measures of reducing the methane emissions and the negative influence of the landfill in the environment. It surveys the materials used for the organization of methane oxidizing systems and introduces the different types (i.e. biofilters, biocovers and biowindows). The author investigates the possibility of using crude oil contaminated soils, which contain high quantity hydrocarbon oxidizing microorganisms, after bioremediation as methane oxidizing system. The article have experimental data of oil contaminated soils (physico-chemical, microbiological and sanitation indicators). The author also proposes using these soils for methane oxidizing materials, and introduces two options of methane oxidizing systems (i.e. biowindow and biocover). According to the experimental evaluation and literary data, it is proved that using oil-contaminated soils as materials for methane oxidizing system in landfilling imposes no negative influences in the environment.

Keywords: landfill, landfill cover, methane, methane oxidation material, greenhouse gas, oily contaminated soil, hydrocarbon oxidized microorganisms, biocover, biowindow, biofilter.

Введение

В процессе жизнедеятельности человека происходит образование значительного количества отходов производства и потребления, необходимость утилизации и переработки которых является актуальной экологической задачей. Одним из приоритетных методов утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) на территории РФ является их захоронение на полигонах ТКО. Однако состояние объектов захоронения ТКО в России характеризуется как неудовлетворительное. Многие полигоны относятся к числу открытых свалок и являются источниками загрязнения объектов окружающей среды [1].

На территории Пермского края действует более 400 свалок, площадь которых составляет более 2000 га. Из общего числа свалок официально разрешенными являются только 160, остальные 240 объектов размещения отходов относятся к несанкционированным свалкам [1]. Объем образования отходов в Пермском крае составляет более 40 млн т в год, из них объем образования ТКО составляет около 1600 тыс. т. В хозяйственный оборот вовлекаются около 7–8 % собранных ТКО, остальной их объем направляется на полигоны захоронения [2], что в долгосрочной перспективе ведет к возникновению эмиссий метана в окружающую среду.

В общем виде полигон ТКО представляет собой специально оборудованное сооружение, предназначенное для утилизации и обезвреживания ТКО, включающее конструктивные элементы для минимизации воздействия объекта на окружающую среду, а именно – гидроизоляционный и верхний рекультивационный экраны, систему сбора биогаза и фильтрата и т.д. На рис. 1 представлена схема полигона ТКО.

Значительную часть ТКО, направляемых на полигоны, составляет органическая фракция отходов, которая включает в себя пищевые отходы, бумагу, картон, текстиль и т.д. Органическая фракция ТКО

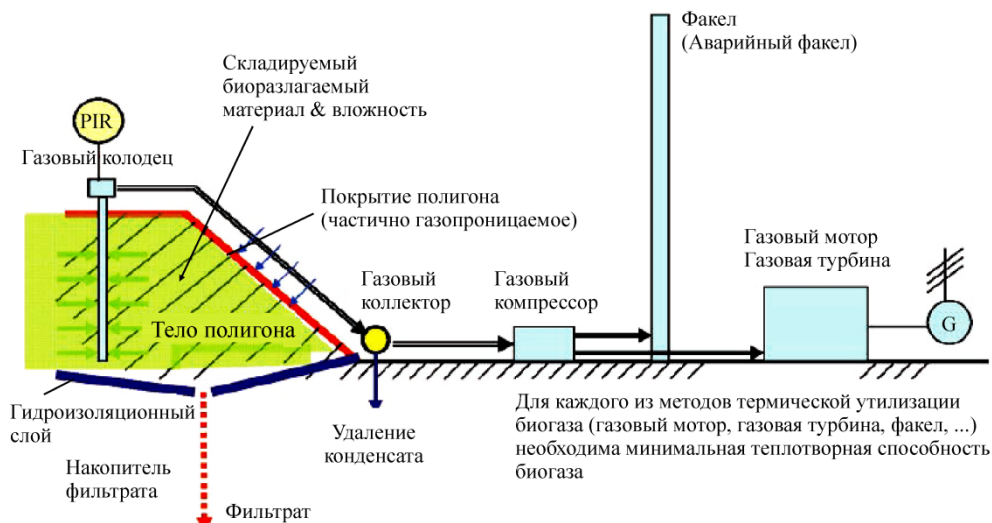


Рис. 1. Схема полигона ТКО с системой сбора и утилизации биогаза и фильтрата [3]

в долгосрочной перспективе представляет собой основной источник образования эмиссий метана, что является следствием процесса анаэробного разложения органических отходов в теле полигона после его закрытия и рекультивации. В связи с этим полигон ТКО можно охарактеризовать как биореактор, в котором происходят процессы анаэробной биодеструкции органических отходов с образованием биогаза ($\text{CH}_4:\text{CO}_2$ в соотношении 60:40 %), однако процесс газообразования в теле полигона является слабо прогнозируемым. Спрогнозировать интенсивность эмиссии метана невозможно в силу непостоянства природно-климатических факторов территории размещения объекта захоронения, а также многокомпонентности органической фракции отходов. В состав органической фракции входят десятки и сотни различных видов отходов, одна часть из которых представляет собой легкодоступные субстраты, другая же труднодоступна для процессов минерализации органических субстратов микроорганизмами.

Воздействие полигона на окружающую среду происходит на эксплуатационном и постэксплуатационном этапе его функционирования, а одним из основных негативных последствий является образование эмиссий метана, который представляет собой бесцветный газ, не имеющий запаха, при этом обладает опасными свойствами, такими как взрыво- и пожароопасность, однако наибольшее воздействие проявляется в токсичности метана для живых организмов. Эмиссии метана создают неблагоприятные условия для жителей близлежащих районов

и обслуживающего персонала, а также оказывают воздействие на нервную систему человека. В окружающей среде метан влияет на климатические условия, являясь парниковым газом [4].

На эксплуатационном этапе жизненного цикла полигона ТКО в период до трех лет происходит формирование негативного воздействия полигона на окружающую среду, однако основная нагрузка полигона на окружающую среду проявляется на постэксплуатационном этапе функционирования полигона. С момента закрытия полигона и его рекультивации в течение первых 15–20 лет происходит значительное образование биогаза и его эмиссия в окружающую среду, в дальнейшем уровень эмиссий метана начинает постепенно сокращаться [5, 6].

В связи с этим необходимо предусматривать природоохранные мероприятия по уменьшению образования метана, сбору и его обезвреживанию после закрытия и рекультивации полигона ТКО.

В настоящее время в российской практике только начинают внедрять технологии по сбору биогаза и выработке электроэнергии. В случаях, когда возникают сложности с транспортировкой газа, собранный газ сжигают на факельных установках в специальном оборудовании. На старых рекультивированных полигонах зачастую отсутствует система дегазации и не проводятся какие-либо мероприятия по минимизации эмиссий метана в окружающую среду. Таким образом, полигон ТКО представляет собой источник неконтролируемых эмиссий метана в окружающую среду.

1. Обзор зарубежного опыта сокращения эмиссий метана от полигонов ТКО

В европейской практике для минимизации эмиссий метана полигонов ТКО (старых рекультивированных полигонов, на которых было размещено значительное количество органической фракции отходов) применяют биологические методы, а именно – окисление метана микроорганизмами в специально оборудованных системах, однако в российской практике данные методы не находят применения.

В силу более разработанного нормативного законодательства на территории Европейского союза снижение воздействия эмиссии метана в окружающую среду является актуальной экологической задачей и предписано нормативными документами¹.

¹ Директива Совета Европейского союза 1999/31/ЕС от 26.04.1999 по полигонам захоронения отходов.

Существуют различные технические решения, используемые с целью снижения эмиссий метана от полигонов ТКО. Одним из таких методов может стать применение защитных гидроизоляционных экранов. Однако опыт зарубежных стран показал, что со временем происходит их деформация из-за неравномерной просадки тела полигона, затрудняется поступление влаги в тело полигона, вследствие чего биологические процессы разложения органических веществ в нем замедляются или вовсе прекращаются. Происходит «консервация» органического вещества в теле полигона, тем самым проблема воздействия полигона на окружающую среду не решается, а только отодвигается на будущее, что не отвечает принципам устойчивого развития. Поэтому в таких странах, как Австрия и Германия, нашли применение специальные покрытия из органических материалов, которые обладают метаноксидационными свойствами и способствуют уменьшению поверхностной эмиссии газа, а также не препятствуют биологической стабилизации ТКО в теле полигона [7].

В настоящее время в Европе, в силу действующего нормативного законодательства, на полигонах ТКО разрешено размещать лишь стабилизированные отходы (содержащие лишь 5 % сухой массы вещества) или отходы после предварительной механо-биологической обработки (т.е. хвосты от утилизации общего потока коммунальных отходов). Размещение на полигонах не обработанных, не стабилизированных (богатых органикой) отходов законодательно запрещено², что было предписано законодательством Германии в 2005 г., Швейцарии – в 2000 г., а законодательством Австрии – в 2004 г. Данные мероприятия изначально снижают воздействие полигона ТКО на объекты окружающей среды и минимизируют образование метана на постэксплуатационном этапе жизненного цикла полигона ТКО. Ввиду отсутствия подобных нормативных актов в РФ и размещения на полигоне всего потока коммунальных отходов, большую часть которого составляет органическая фракция, вопрос снижения эмиссий метана полигонов ТКО для РФ является наиболее актуальной экологической задачей.

² Директива Совета Европейского союза 1999/31/EC от 26.04. 1999 г. по полигонам захоронения отходов; Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) / Fassung vom 20.09.2015. Österreich, 2002; Verordnung des Bundesministers für Land – und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (DVO). Österreich. 2008; Deponieverordnung (DepV), Deutschland. April 2009. Vom 27; Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten (VASA). Schweiz. September 2008. Vol. 26.

Снизить эмиссии метана от полигонов ТКО после их рекультивации возможно за счет применения биологических методов, а именно – биофильтров, биопокрытий и биоокон (*biowindow*), обладающих метаноксидационными свойствами.

Биофильтры (*biofilter*) представляют собой резервуары прямоугольной или круглой формы, которые засыпают загрузочным материалом [8–10]. В биофильтрах в качестве загрузочного материала преимущественно используется компост [11–13]. Поглощение метана биофильтром может осуществляться в объеме 10–20 г в час/м³, максимальный объем удаленного метана может составить 70 г в час/м³ [6]. В зарубежной литературе представлены два варианта реализации биофильтра (рис. 2).

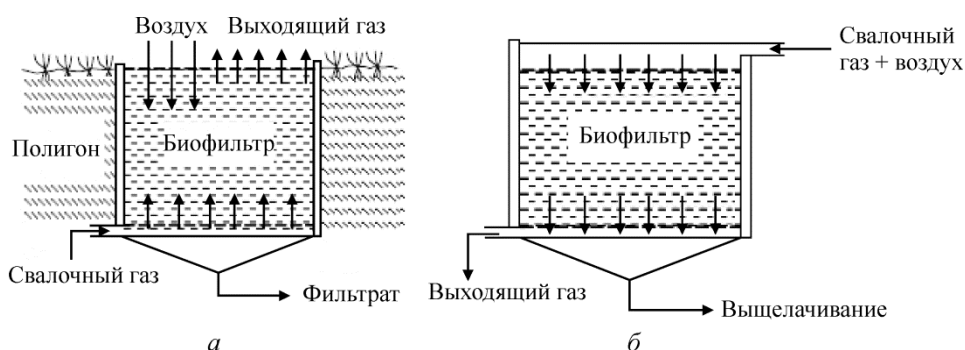


Рис. 2. Конструкция биофильтра, предназначенного для снижения эмиссии метана от полигона ТКО [6]: а – модель биофильтра, предназначенная для непосредственной установки в теле полигона; б – модель биофильтра, которая может иметь мобильный характер (без монтажа в тело полигона)

Поскольку для реализации биофильтра необходима система дегазации полигона, использование биофильтров будет невозможно на старых полигонах, на которых система дегазации и сбора биогаза отсутствует.

Перспективным вариантом для старых рекультивированных свалок, без специально оборудованной системы дегазации, может стать применение биопокрытий (*biocover*). В качестве материала для биопокрытия используют компост, полученный в процессе механо-биологической обработки коммунальных отходов, компост от площадок компостирования, суглинистые материалы. Важным элементом в составе биопокрытия является крупный гравий, используемый для создания пор в материале и играющий важную роль в распределении биогаза [14, 15]. На рис. 3 представлена схема биопокрытия полигона ТКО.

Принцип работы биопокрытия заключается в том, что свалочный газ, проходя через слой из пористого материала, распределяется по порам, где происходит его окисление и дальнейшая диффузия окисленных продуктов (CO_2) в окружающую среду.

Применение биопокрытия целесообразно при отсутствии системы дегазации полигона, а также на старых рекультивированных полигонах с низкими значениями эмиссии метана в окружающую среду.

При наличии системы дегазации на полигоне ТКО возможно применение биоокон (*biowindow*). Они уместны, когда применение биопокровов экономически не целесообразно. На рис. 4 представлена принципиальная схема биоокна.

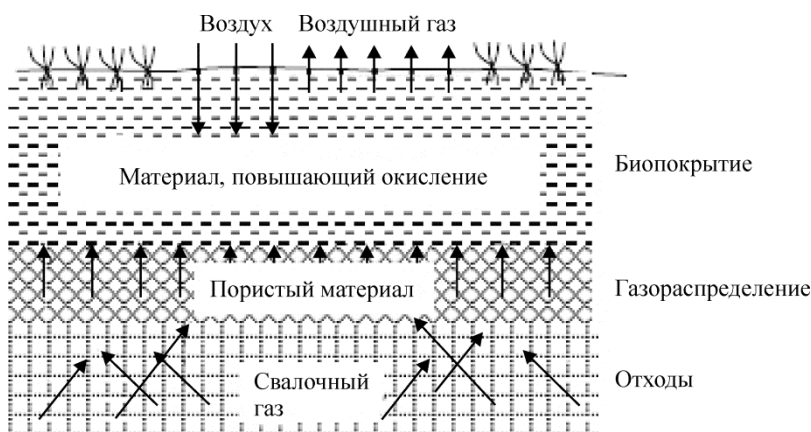


Рис. 3. Конструкция биопокрытия, предназначенного для снижения эмиссий метана от полигона ТКО [6]

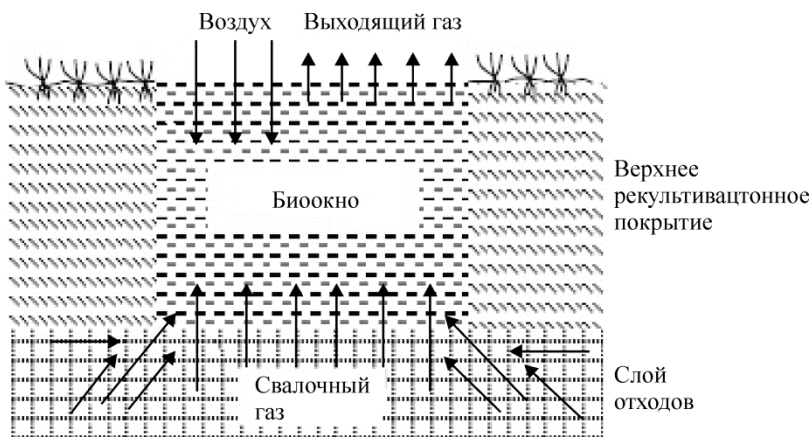


Рис. 4. Конструкция биоокна, предназначенного для снижения эмиссии полигона ТКО [6]

В качестве загрузочного материала для биоокон преимущественно используют компост. Биоокна имеют дискретный характер, обычно не имеют специальных элементов и внедрены непосредственно в верхнее рекультивационное покрытие полигона.

При выборе варианта снижения эмиссий метана на полигонах ТКО необходимо учитывать специфику полигона и используемых технических решений. В табл. 1 представлены сравнительная характеристика, преимущества и недостатки вариантов организации метаноксидационных систем.

Таблица 1

Сравнительная характеристика, преимущества
и недостатки метаноксидационных систем [6]

Характеристика	Биофильтр (<i>Biofilter</i>)	Биопокрытие (<i>Biocover</i>)	Биокно (<i>Biowindow</i>)
Область применения	Без получения биогаза, в качестве промежуточного или окончательного мероприятия, во время эксплуатации полигона, на рекультивированных или старых полигонах ТКО	Временные или окончательные меры, с альтернативной возможностью получения биогаза. Применение во время эксплуатационного и постэксплуатационного этапа жизненного цикла полигона ТКО, а также на старых полигонах ТКО	Временная или окончательная мера, применяется в большей мере на старых полигонах ТКО
Используемые материалы (примеры)	Не органические и органические материалы (компост, торфяные и песчаные смеси и т.д.)	Крупнозернистые почвы, компостная смесь, специальные смеси на основе отходов	Неорганические и органические материалы (компост, торфяные и песчаные смеси и т.д.)
Преимущества	– возможность контроля условий эксплуатации (за исключением подачи потока газа); – отсутствие необходимости в специальной системе принудительного извлечения биогаза	– пригодность в течение длительного времени для малых объемов эмиссий биогаза; – высокая способность удерживания биогаза и высокая эффективность его окисления; – большая полезная площадь поверхности при высокой нагрузке и аварийных ситуациях; – положительное влияние на вегетацию и влагообмен	– быстрый и легкий монтаж; – отсутствие необходимости организации системы извлечения биогаза; – хороший вариант для точечных источников эмиссий биогаза
Недостатки	– непригодность для не постоянного потока газа;	– вероятность ограничения количества субстрата;	– ограничение зоны охвата непостоянных

Окончание табл. 1

Характеристика	Биофильтр (<i>Biofilter</i>)	Биопокрытие (<i>Biocover</i>)	Биоокно (<i>Biowindow</i>)
	– необходимость сбора газа; – риск превышения окислительной мощности материала по метану; – сложность оценки эффективности; – необходимость в подключении к системе дегазации полигона	– трудоемкость мониторинга; – сложность оценки эффективности; – сложность комплексной оценки всей площади покрытия; – невозможность контроля эксплуатационных условий	эмиссий биогаза; – риск превышения окислительной мощности материала по метану; – сложность оценки эффективности

В метаноксидационных системах полигонов ТКО в качестве метаноксидационного материала в основном применяют компост от установок по компостированию или механо-биологической обработки коммунальных отходов. Одним из перспективных направлений при создании метаноксидационных систем (биофильтров, биопокровов, биоокон) может стать применение очищенной нефтезагрязненной почвы (НЗП), содержащей высокую численность углеводородокисляющих микроорганизмов (УВОМ), что потенциально может обеспечить высокую эффективность окисления метана и снижение его эмиссий на постэксплуатационном этапе функционирования полигонов ТКО.

2. Обоснование применения НЗП в качестве метаноксидационного материала на основании экспериментальных и литературных данных

На территории РФ интенсивно развита нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая и нефтепродуктообращивающая промышленность, деятельность которой приводит к загрязнению природных почв нефтепродуктами и образованию такого вида опасного отхода, как нефтезагрязненная почва (НЗП). Нефтезагрязненные почвы подвергают биоремедиации, однако даже после очистки восстановление исходных показателей не нарушенных природных почв происходит длительное время.

Нефтяное загрязнение приводит к формированию в почве микробного сообщества, способного с высокой эффективностью ассимилировать углеводороды. Высокая численность углеводородокисляющих микроорганизмов (УВОМ) сохраняется значительное время и даже в очищенной нефтезагрязненной почве с низкими концентрациями нефтепродуктов (менее 10 г/кг).

Высокая численность УВОМ, а также наличие различных физиологических групп микроорганизмов в их составе, способных осуществлять различные ферментативные реакции в отношении углеводов, потенциально может обеспечить высокую эффективность применения очищенной НЗП в качестве материала для метаноксидационных систем. В табл. 2 представлена характеристика нефтезагрязненной почвы при высокой и низкой степени загрязнения углеводородами, а также фоновой не загрязненной почвы.

Таблица 2

Характеристика нефтезагрязненных почв
с разной степенью загрязнения нефтепродуктами

Образец НЗП	Концентрация нефтепродуктов, г/кг	Численность УВОМ, КОЕ/г	Состав микробиоценоза*
<i>Нефтезагрязненная почва</i>			
Почва, загрязненная нефтью Бугурусланско- го месторождения (Оренбургская область)	40,0±2,3	$(5,85 \pm 1,08) \cdot 10^6$	«+++» бактерии «++» актиномицеты «-» микроскопиче- ские грибы
Почва, загрязненная нефтью Бугурусланско- го месторождения (Оренбургская область)	96,0±6,9	$(5,77 \pm 0,44) \cdot 10^7$	«+++» бактерии «+» актиномицеты «-» микроскопиче- ские грибы
Почва, загрязненная нефтью Кокуйского месторож- дения (Пермский край)	78,5±3,5	$(1,8 \pm 0,8) \cdot 10^6$	«+++» бактерии «+» актиномицеты «-» микроскопиче- ские грибы
<i>Нефтезагрязненная почва после очистки</i>			
Почва, загрязненная нефтью Бугурусланско- го месторождения (Оренбургская область)	6,8±0,6	$(5,25 \pm 0,51) \cdot 10^5$	«+++» актиномицеты «+++» бактерии «+» микроскопиче- ские грибы
Почва, загрязненная нефтью Бугурусланско- го месторождения (Оренбургская область)	12,3±2,3	$(3,00 \pm 0,39) \cdot 10^5$	«+++» актиномицеты «+++» бактерии «+» микроскопиче- ские грибы
Почва, загрязненная нефтью Кокуйского месторождения (Перм- ский край)	7,3±2,1	$(1,64 \pm 0,9) \cdot 10^5$	«+++» актиномицеты «+» бактерии «+» микроскопиче- ские грибы
Фоновая почва, не за- грязненная нефтепро- дуктами	—	$(5,50 \pm 0,17) \cdot 10^2$	«+++» актиномицеты «+++» микроскопиче- ские грибы «+» бактерии

* Групповой состав УВОМ: «+++» – высокая численность; «++» – средняя численность; «+» – низкая численность; «-» – микроорганизмы отсутствуют.

В очищенной нефтезагрязненной почве развиваются физиологические группы аэробных микроорганизмов (микроскопические грибы, актиномицеты), что свидетельствует о восстановлении агрохимических свойств почвы и снижении ее токсичности, что не должно привести к возникновению дополнительной нагрузки на полигон ТКО при использовании ее в качестве материала для метаноксидационного экрана. Данное предположение подтверждается рядом нормативных требований по содержанию нефтепродуктов в почве, которые в настоящее время разработаны и утверждены на региональном уровне для следующих регионов: Ханты-Мансийский АО, Республика Коми, Республика Татарстан, Ямало-Ненецкий АО.

В табл. 3 представлена сравнительная характеристика допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах (ДОСНП) при проведении рекультивационных и иных восстановительных работ для различных регионов РФ в соответствии с дальнейшим направлением использования нефтезагрязненной территории. Данные представлены для поверхностного слоя органоминеральной почвы глубиной от 0 до 20 см [16].

Таблица 3

ДОСНП после проведения рекультивационных
и иных восстановительных работ, г/кг [16]

Регион	Направление использования территории		
	сельскохозяйственное	лесохозяйственное	промышленное (строительство)
Ханты-Мансийский АО	5,0	15,0	5,0
Республика Коми	1,0	10,0	30,0
Республика Татарстан	2,9	2,9	–
Ямало-Ненецкий АО	1,0	–	20,0

Использование нефтезагрязненной почвы после процесса биоремедиации в качестве метаноксидационного материала, согласно региональным нормативам, в диапазоне концентраций 1,0–15 г/кг не должно привести к увеличению нагрузки на окружающую среду. Несмотря на то что для промышленного строительства региональными нормативами определена возможность использования нефтезагрязненной почвы с концентрациями нефтепродуктов 20–30 г/кг, почва с данными концентрациями нефтепродуктов не будет рекомендована к использованию в качестве метаноксидационного материала. Это объясняется тем,

что нефть обволакивает почвенные частицы, приводя к сильному увеличению гидрофобности почв, тем самым почва утрачивает способность впитывать и удерживать влагу, происходит вытеснение воздуха из почвенных пор и в конечном итоге нарушается водный и воздушный режимы почвы, что подтверждает слабое развитие в нефтезагрязненной почве таких физиологических групп микроорганизмов, как микроскопические грибы и актиномицеты. К тому же при данных концентрациях наблюдается токсическое воздействие углеводородов на некоторые группы микроорганизмов.

Проведенная оценка очищенной нефтезагрязненной почвы по санитарно-гигиеническим показателям на базе лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае» показала отсутствие ее эпидемиологической опасности для объектов окружающей среды (табл. 4).

Таблица 4

Результаты санитарно-гигиенической оценки
очищенной нефтезагрязненной почвы

Показатель	Ед. изм.	Значение
ОМЧ	КОЕ/г	$3,8 \cdot 10^3$
Термофильные бактерии	КОЕ/г	70
Индекс БГКП	кл./г	100
Индекс энтерококков	кл./г	менее 1
Патогенные бактерии, в том числе сальмонеллы	в 1 г почвы	не обнаружено
Сульфитредуцирующие клостридии	КОЕ/г	более $1 \cdot 10^5$
Выделенные микроорганизмы	в 1 г почвы	<i>Enterobacter cloacae</i> 10^2

В анализируемых образцах почвы патогенных бактерий, а также превышения контролируемых показателей обнаружено не было, однако отмечено присутствие бактерий *Enterobacter cloacae*. Присутствие данного вида бактерий объясняется тем, что для лабораторных исследований почва была отобрана с площадки биоремедиации, на которой помимо структуратора в почву в качестве дополнительного источника азота и органических субстратов вносили навоз крупного рогатого скота. В связи с этим может быть рекомендовано использовать в технологии биоремедиации только минеральные удобрения.

В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям по воздействию нефтяного загрязнения на растительность. В отношении полигона ТКО данный аспект представляет интерес в связи с тем, что использование НЗП не должно нарушать вегетацию на верхнем рекультивационном слое.

В некоторых работах по исследованию фитотоксичности НЗП приводятся данные, согласно которым нефтяное загрязнение способствует росту токсинообразующих микромицетов в прикорневой зоне, однако данные микромицеты могут содержаться и в незагрязненной почве, только не имеют доминирующего действия. В связи с этим складывается противоречивое мнение о воздействии нефтяного загрязнения на рост высших растений и прорастание в почве семян. Влияние нефти на растение делится на два вида – прямое и косвенное. Прямое действие происходит в случае, когда воздействует непосредственное токсическое или стимулирующее действие углеводов. Косвенное действие заключается в опосредованном влиянии, т.е. через изменение физико-химических свойств почв, однако косвенное воздействие сильно зависит от других экологических факторов и может варьироваться в зависимости от условий окружающей среды [17]. В силу того что возникновение эффекта фитотоксичности очищенной НЗП на растения нельзя полностью исключить, может быть предложено использование очищенной НЗП в качестве подстилающего слоя для верхнего рекультивационного слоя. При толщине верхнего рекультивационного слоя более 30 см не должно происходить возникновение фитотоксического эффекта, поскольку развитие корневой системы большинства растений происходит преимущественно в верхнем почвенном горизонте.

3. Технические решения по организации метаноксидационного экрана полигона ТКО с применением НЗП

На основании анализа существующих технических решений по снижению эмиссий метана на полигонах ТКО и данных о показателях нефтезагрязненной почвы могут быть рекомендованы два варианта организации метаноксидационной системы – биоокно и биопокрытие.

Биоокно с использованием в качестве метаноксидационного материала очищенной нефтезагрязненной почвы (рис. 5) может быть использовано на полигонах ТКО, имеющих систему дегазации.

Биопокрытие может стать техническим решением для старых полигонов ТКО, на которых отсутствует система дегазации и эмиссии метана неравномерно распределены по поверхности полигона (рис. 6).

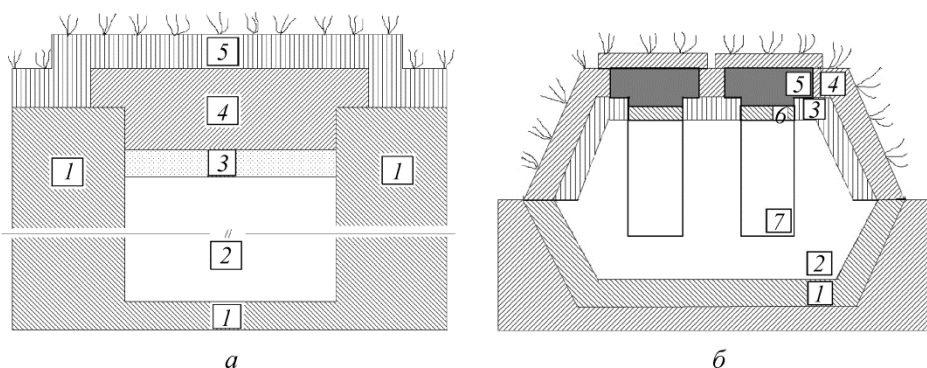


Рис. 5. Схема биоокна с НЗП: *а*: 1 – массив ТКО; 2 – газодренажный колодец; 3 – гравий; 4 – метанооксидационное окно с загрузкой из НЗП; 5 – верхний рекультивационный слой; *б*: 1 – противофильтрационный экран; 2 – массив ТКО; 3 – гидроизоляционное покрытие; 4 – верхнее рекультивационное покрытие; 5 – метанооксидационное окно с загрузкой из НЗП; 6 – гравий; 7 – газодренажный колодец

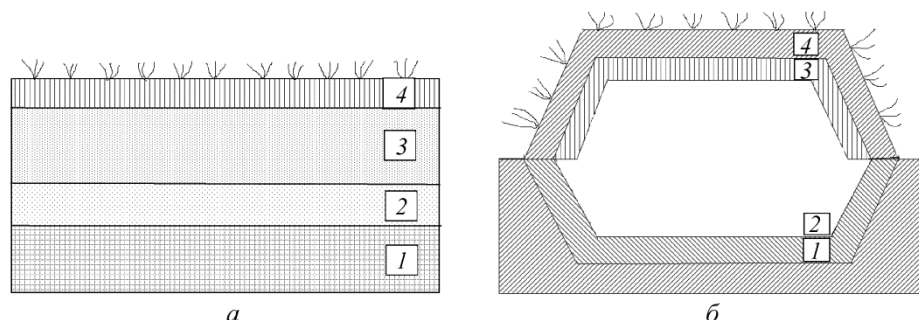


Рис. 6. Схема биопокрытия в качестве НЗП: *а*: 1 – массив ТКО; 2 – гравий; 3 – метанооксидационное окно с загрузкой из НЗП; 4 – верхний рекультивационный слой; *б*: 1 – противофильтрационный экран; 2 – массив ТКО; 3 – метанооксидационный слой с загрузкой из НЗП; 4 – верхнее рекультивационное покрытие

Заключение

Использование очищенной нефтезагрязненной почвы в качестве метанооксидационного материала может стать перспективным направлением при рекультивации полигонов ТКО с целью сокращения эмиссий метана в окружающую среду. Теоретически возможно использование нефтезагрязненной почвы после биоремедиации с остаточными концентрациями нефтепродуктов 1,0–15 г/кг, что отвечает ряду региональных нормативов для использования данной почвы в лесохозяйственных целях, а также в целях промышленного строительства. При этом использование данной почвы в качестве метанооксидационного

материала на полигоне ТКО не должно привести к увеличению нагрузки полигона на окружающую среду. Высокая численность УВОМ в очищенной НЗП – от $(1,64 \pm 0,9) \cdot 10^5$ до $(5,25 \pm 0,51) \cdot 10^5$ КОЕ/г, а также высокое биологическое разнообразие УВОМ, проявляющих активность в отношении ассимиляции углеводов, потенциально может обеспечить высокую эффективность окисления метана слоем почвы с остаточными концентрациями углеводов.

В зависимости от конструкции полигона ТКО применение нефтезагрязненной почвы может быть реализовано посредством биоокна при локальных источниках эмиссии метана или биопокрытия, при распределении эмиссий метана по всей поверхности полигона.

Как альтернативный вариант может быть предложено комбинирование слоев из очищенной нефтезагрязненной почвы и компоста с целью повышения эффективности окисления метана, а также исключения возможного фитотоксического эффекта НЗП.

Список литературы

1. Вайсман Я.И., Вайсман О.Я., Максимова С.В. Управление метаногенезом на полигонах твердых бытовых отходов / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2003. – 232 с.
2. Изучение состава отходов массива полигона ТБО / Ю.М. Загорская, Н.Н. Слюсарь, С.В. Паршакова, Ю.В. Завизион // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2013. – № 4. – С. 144–154.
3. Schulz R., Steinbrecht D., Rickert I. Was tun, wenn Deponiegas nur noch als Emission gilt...? // 9 Leipziger Deponiefachtagung: Planung, Bau, Betrib, Stillegung, Nachsorge, und Nachnutzung von Deponien, 26/27. – Februar 2013. – S. 185–198.
4. Любинская Т.В. Снижение эмиссии биогаза ТБО как важнейший элемент сокращения «парникового» эффекта // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 1. – С. 76–81.
5. Куриленко В.В., Подлипский И.И., Осмоловская Н.Г. Эколого-геологическая и биогеохимическая оценка воздействия полигонов твердых отходов на состояние окружающей среды // Экология и промышленность России. – 2012. – № 11. – С. 28–32.

6. Huber-Humer M., Gebert J., Hilger H. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions // *Waste Management & Research*. – 2008. – № 26. – P. 33–46.

7. Матвеев Ю.Б., Пухнюк А.Ю. Полигоны бытовых отходов: ситуация и перспективы // *Твердые бытовые отходы*. – 2013. – № 6. – С. 37–42.

8. Haubrichs R., Widmann R. Evaluation of aerated biofilter systems for microbial methane oxidation of poor landfill gas // *Waste Management*. – 2006. – № 26. – P. 408–416.

9. Streese J., Stegmann R. Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters // *Waste Management*. – 2003. – № 23. – P. 573–580.

10. Технология снижения газовой эмиссии на полигонах твердых бытовых отходов / Л.В. Рудакова, Ю.Я. Нетребин, Я.И. Вайсман, Т.В. Нурисламова // *Инженерная экология*. – 2004. – № 3. – С. 51–55.

11. Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfills – An experimental simulation in lysimeters / M. Hrad, M. Huber-Humer, B. Wimmerb, G. Thomas // *Waste Management*. – 2012. – № 32. – P. 2324–2335.

12. Wilshusen J.H., Hettiaratchi J.P.A., Stein V.B. Long-term behavior of passively aerated compost methanotrophic biofilter columns // *Waste Management*. – 2004. – № 24. – P. 643–653.

13. Effects of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in a landfill cover / T. Abichou, K. Mahieu, L. Yuan, J. Chanton, G. Hater // *Waste Management*. – 2009. – № 29. – P. 1595–1601.

14. Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation / J.C. Stern, J. Chanton, T. Abichou, D. Powelson, L. Yuan, Sh. Escoriza, J. Bogner // *Waste Management*. – 2007. – № 27. – P. 1248–1258.

15. Huber-Humer M., Röder S., Lechner P. Approaches to assess biocover performance on landfills // *Waste Management*. – 2009. – № 29. – P. 2092–2104.

16. Проблемы нормирования допустимого содержания нефтепродуктов в природных почвах на примере российского и немецкого законодательства / М.В. Ахмадиев, Л.В. Рудакова, А.А. Орлов, Я.Л. Мильман, И. Граф // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф.* – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – Т. 2. – С. 50–58.

17. Назаров А.В. Влияние нефтяного загрязнения почвы на растения // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2007. – № 5. – С. 134–141.

References

1. Vaisman Ia.I., Vaisman O.Ia., Maksimova S.V. Upravlenie metanogenezom na poligonakh tverdykh bytovykh otkhodov [Management of landfill methane formation]. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003. 232 p.

2. Zagorskaia Iu.M., Sliusar' N.N., Parshakova C.V., Zavizion Iu.V. Izuchenie sostava otkhodov massiva poligona TBO [Research of landfill municipal waste mixture]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiia. Urbanistika*, 2013, no. 4, pp. 144-154.

3. Schulz R., Steinbrecht D., Rickert I. Was tun, wenn Deponiegas nur noch als Emission gilt...? *9 Leipziger Deponiefachtagung: Planung, Bau, Betrieb, Stilllegung, Nachsorge, und Nachnutzung von Deponien*, 26/27, Februar 2013, pp. 185-198.

4. Liubinskaia T.V. Snizhenie emissii biogaza TBO kak vazhneishii element sokrashcheniia "parnikovogo" effekta [Reduce of biogas emissions of municipal waste how impotent element of "greenhouse" effect reduction]. *Vestnik RUDN. Seriia "Ekologiia i bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti"*, 2010, no. 1, pp. 76-81.

5. Kurilenko V.V., Podlipskii I.I., Osmolovskaia N.G. Ekologo-geologicheskaiia i biogeokhimicheskaiia otsenka vozdeistviia poligonov tverdykh otkhodov na sostoianie okruzhaiushchei sredy [Ecological geological and biotechnological assessment of landfilling influence in environment]. *Ekologiia i promyshlennost' Rossii*, 2012, no. 11, pp. 28-32.

6. Huber-Humer M., Gebert J., Hilger H., Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. *Waste Management & Research*, 2008, no. 26, pp. 33-46.

7. Matveev Iu.B., Pukhniuk A.Iu. Poligony bytovykh otkhodov: situatsiia i perspektivy [Landfills of municipal waste: situation and perspectives]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2013, no. 6, pp. 37-42.

8. Haubrichs R., Widmann R. Evaluation of aerated biofilter systems for microbial methane oxidation of poor landfill gas. *Waste Management*, 2006, no. 26, pp. 408-416.

9. Streese J., Stegmann R. Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters. *Waste Management*, 2003, no. 23, pp. 573-580.
10. Rudakova L.V., Netrebin Iu.Ia., Vaisman Ia.I., Nurislamova T.V. Tekhnologiya snizheniia gazovoi emissii na poligonakh tverdykh bytovykh otkhodov [Reduce technology of gas emissions in municipal waste landfills]. *Inzhenernaia ekologiya*, 2004, no. 3, pp. 51-55.
11. Hrad M., Huber-Humer M., Wimmerb B., Thomas G. Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfills – An experimental simulation in lysimeters. *Waste Management*, 2012, no. 32, pp. 2324-2335.
12. Wilshusen J.H., Hettiaratchi J.P.A., Stein V.B. Long-term behavior of passively aerated compost methanotrophic biofilter columns. *Waste Management*, 2004, no. 24, pp. 643-653.
13. Abichou T., Mahieu K., Yuan L., Chanton J., Hater G. Effects of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in a landfill cover. *Waste Management*, 2009, no. 29, pp. 1595-1601.
14. Stern J.C., Chanton J., Abichou T., Powelson D., Yuan L., Escoriza Sh., Bogner J. Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. *Waste Management*, 2007, no. 27, pp. 1248-1258.
15. Huber-Humer M., Röder S., Lechner P. Approaches to assess biocover performance on landfills. *Waste Management*, 2009, no. 29, pp. 2092-2104.
16. Akhmadiev M.V., Rudakova L.V., Orlov A.A., Mil'man Ia.L., Graf I. Problemy normirovaniia dopustimogo sodержaniia nefteproduktov v prirodnykh pochvakh na primere rossiiskogo i nemetskogo zakonodatel'stva [Problems of permissible oil content in nature soils for example Russian and German law]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, vol. 2, pp. 50-58.
17. Nazarov A.V. Vliianie neftianogo zagriazneniia pochvy na rasteniia [Influence of oil contamination for plants]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriia "Biologiya"*, 2007, no. 5, pp. 134-141.

Получено 10.11.2015

Об авторах

Ахмадиев Максим Владимирович (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: akhmadiev-m@yandex.ru).

Чугайнова Анастасия Александровна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: chugainova_A@mail.ru).

About the authors

Maksim V. Akhmadiev (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: akhmadiev-m@yandex.ru).

Anastasiia A. Chugainova (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: chugainova_A@mail.ru).