

Оригинальная статья

УДК 614.718

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-20-36>

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ НА ПОЛИГОНАХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПО МИКРОБНОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ И СПОСОБ ЕГО ОЧИСТКИ

К. В. Воробьев¹, А. Н. Чусов¹, Н. А. Политаева^{1✉}, А. В. Щур²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

² Белорусско-Российский университет
Республика Беларусь, 212000, г. Могилев, проспект Мира, д. 43

Поступила в редакцию 30.10.2022 г., после доработки 02.12.2022 г., принята 02.12.2022 г.

Аннотация. Биогаз полигонов содержит большое количество вредных и опасных примесей и может быть источником микробиологического загрязнения как самого полигона твердых коммунальных отходов, так и прилегающих территорий. В данной работе используются современные биотехнологии, предназначенные для защиты окружающей среды, изучения количественного и качественного состава биогаза на предмет содержания в нем вредных микроорганизмов, а также удаления опасных примесей из биогаза. Проведена оценка возможности очистки воздуха помещений полигонов и прилегающих к ним территорий зелеными насаждениями с использованием системы биологической очистки на базе аппаратно-биологического комплекса от микробиологического загрязнения. Данные проведенных лабораторных исследований показывают, что аппаратно-биологические комплексы позволяют снизить негативное воздействие на персонал и работников оперативных пунктов и жителей прилегающих территорий путем очистки воздуха.

Ключевые слова: воздух помещений, аппаратно-биологический комплекс, очистка воздуха, микробное загрязнение, пылевые частицы, свалка, адгезия, *Tradescantia fluminensis*

Для цитирования. Воробьев К. В., Чусов А. Н., Политаева Н. А., Щур А. В. Оценка качества воздуха помещений на полигонах твердых коммунальных отходов по микробному загрязнению и способ его очистки // Поволжский экологический журнал. 2023. № 1. С. 20 – 36. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-20-36>

✉ Для корреспонденции. Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ORCID и e-mail адреса: Воробьев Константин Владимирович: <https://orcid.org/0000-0002-8870-5843>, vorobiev_kv@spbstu.ru; Чусов Александр Николаевич: <https://orcid.org/0000-0002-1388-8649>, chusov_an@spbstu.ru; Политаева Наталья Анатольевна: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>, politaevana1971@gmail.com; Щур Александр Васильевич: <https://orcid.org/0000-0002-9558-7005>, shchur@yandex.by.

ВВЕДЕНИЕ

В России наиболее распространенным способом утилизации отходов является захоронение. Полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) представляют опасность для окружающей среды и здоровья населения не только во время эксплуатации, но и после их закрытия в течение длительного периода. Основные причины длительного негативного воздействия – загрязнение атмосферного воздуха выбросами биогаза и загрязнение поверхностных и подземных вод токсичными фильтратами (Масликов и др., 2012; Nolasco et al., 2008).

Основным компонентом биогаза является метан (сильный парниковый газ и ценное топливо (Zinchenko et al., 2002)). Большое скопление этого газа может вызывать пожары на полигонах ТКО, потушить которые практически невозможно. Кроме того, биогаз содержит не только большое количество вредных и опасных примесей (Palmiotto et al., 2014), но и может являться источником микробиологического загрязнения полигона ТКО и прилегающих территорий. Выбросы микроорганизмов со свалок и предприятий по компостированию отходов (компостных заводов), а также запах, выделяемый ими (Herr et al., 2003), часто вызывают жалобы жителей, в частности людей, живущих вблизи таких заводов (Albrecht et al., 2008; Zhang et al., 2014).

Значительное количество полигонов ТКО в России не соответствует санитарно-гигиеническим и экологическим нормам (Ryzhakova et al., 2014). Строительство систем сбора и утилизации биогаза позволит не только производить электрическую и тепловую энергию для внесетевых нагрузок (Чусов и др., 2013; Zubkova et al., 2014 *a, b*; Zhazhkov et al., 2015), но и будет являться эффективным способом защиты окружающей среды. Однако направление использования биогаза полигонов ТКО в энергетических целях в России только начинает развиваться (один из пилотных проектов – строительство системы сбора биогаза для производства энергии на полигоне ТКО «Новый Свет» в Ленинградской области (Масликов и др., 2013)). Кроме того, это направление требует значительных капиталовложений, которые зачастую превышают инвестиционные возможности муниципальных образований. Поэтому крайне актуальна разработка других, достаточно дешевых, но эффективных мер по защите окружающей среды от воздействия, связанного с полигонами ТКО.

Новизна данного исследования заключается в изучении органолептических показателей полигона ТКО в Новоселках, а также соседнего полигона хранения отходов очистки сточных вод «Северный» в Санкт-Петербурге. Примечательно, что в России нет нормативов, регулирующих запах в населенных пунктах. В соответствии с Гигиеническими требованиями, принятыми в 2001 г. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) России, контроль атмосферного воздуха населенных пунктов должен осуществляться на предмет содержания в нем вредных веществ. Чрезмерно высокие концентрации таких веществ классифицируются как нарушение. Но присутствие сильного неприятного запаха не всегда сопровождается наличием чрезмерно высоких концентраций вредных веществ в воздухе. Полигон в Новоселках начал работу в 1972 г. и уже на протяжении многих лет подлежит закры-

тию, однако правительство не смогло создать современную замену данному полигону ТКО. Полигон «Северный» начал работать позже, в 1986 году. Жалобы жителей на неприятный запах появились только в последние несколько лет, что может быть связано с вырубкой соседнего леса (который являлся естественной стабилизирующей преградой между жителями и полигонами) с целью создания индустриального парка для заводов Nissan и Hyundai. Также к полигонам примыкает одна из главных транспортных артерий города – КАД.

В связи с этим следует обратить особое внимание на использование современных биологических подходов для защиты окружающей среды (Soreanu et al., 2013; Andrianova et al., 2014), а также на снижение распространения биогаза и изучения количественного и качественного содержания вредных микроорганизмов в нем.

Оценку биологической очистки воздуха полигонов можно разделить на две основные категории: очистка воздуха внутри помещений и на открытом воздухе вокруг них (в полевых условиях).

Анализ литературы показал, что качество воздуха на полигоне зависит от разных факторов. Эти параметры включают в себя качество компоста, полученного на полигонах. Компост может загрязнять окружающую среду за счет распространения следующих загрязняющих веществ: тяжелые металлы (Deportes et al., 1995; Hargreaves et al., 2008), токсичные компоненты и летучие органические соединения (Soreanu et al., 2013). Также научно доказано, что он может причинять вред здоровью (Fischer et al., 2008; Kalwasinska, Burkowska, 2013; Wery, 2014), а также приносить неудобства из-за пахучих соединений (Herr et al., 2003; Vitezova, Vitez, 2013; Palmiotto et al., 2014). В воздухе компостных куч присутствуют различные группы микроорганизмов, представленные психрофильными и мезофильными бактериями (Kalwasinska et al., 2014), микроскопическими термотолерантными грибами (Vitezova, Vitez, 2013), термофильными актиномицетами (Fischer et al., 2008) и др.

В частности, воздействие биоаэрозолей, связанное с атмосферной дисперсией или обработкой компоста (Bünger et al., 2007), представляет риск для здоровья подвергающихся такому воздействию групп лиц (Deportes et al., 1995; Gorny et al., 2002). К ним относится как рабочий персонал, так и население соседних жилых районов (Le Goff et al., 2012). Биоаэрозоль или органическая пыль – это термин, используемый для описания переносимых по воздуху микроорганизмов, таких как грибки или бактерии, или побочных продуктов, например, эндотоксинов и глюконов (Douwes et al., 2003; Taha et al., 2006; Wery, 2014), которые могут приводить к аллергическим реакциям, могут влиять на здоровье органов дыхания (Le Goff et al., 2012) или оказывать другие воздействия (Nikaee et al., 2009; Hung et al., 2010; Liang et al., 2013).

Более того, анализ литературы показал, что существуют сильные различия по качеству воздуха внутри помещений на полигонах и прилегающих территориях (Аликбаева и др., 2010; Kalwasinska et al., 2014). Воздух офисов на полигонах характеризовался повышенной концентрацией переносимых по воздуху бактерий и грибков (Lis et al., 2004). В работе Данута О. Лис (Lis et al., 2004) показано, что

офисы на полигонах можно отнести к категории, характеризующейся высокой и очень высокой бактериальной и грибковой контаминацией воздуха помещений. Отмечается влияние сезона на концентрацию бактерий, а также грибов: летом выше, чем зимой (Grisoli et al., 2009). Сезонное снижение концентраций бактериального и грибкового аэрозоля может быть вызвано низкой температурой воздуха, промерзшей почвой или снежным покровом – условиями, не благоприятствующими размножению, распространению патогенных микробов «пылевым» путем (Lis et al., 2004; Huttunen et al., 2010).

Кроме того, перенос твердых и жидких летучих пылевых частиц может увеличивать численность микроорганизмов, которые представляют собой типичное аэрозольное загрязнение атмосферного воздуха.

На основании анализа литературы, для исследований очищающей способности растений от микробного загрязнения был выбран паутинник *Tradescantia fluminensis*. Это неприхотливое растение, которое быстро размножается и увеличивает свою массу. *T. fluminensis* эффективно поглощает загрязняющие вещества, интенсивно выделяет кислород и фитонциды.

В первую очередь растения представляются в качестве основных фильтров, которые имеют развитую площадь поверхности с восковым образованием – кутикулой, с хорошо удерживающими свойствами по отношению к микроорганизмам и летучим частицам. Кроме того, все растения обладают переменной способностью выделять фитонциды для самозащиты растений от вредоносных микроорганизмов, а также активно воздействовать на состав окружающей среды. Более того, фитонциды, продуцируемые поверхностью листьев, можно рассматривать как биологическое средство, препятствующее размножению микроорганизмов, прикрепившихся к поверхности листьев (Цыбуля и др., 2000).

Основной целью исследования является оценка возможности очистки воздуха помещений полигонов и прилегающих к ним территорий от микробиологического загрязнения зелеными насаждениями с использованием системы биологической очистки на базе аппаратно-биологического комплекса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Лабораторная испытательная камера. Для изучения возможности очистки воздуха зелеными растениями паутинника (*Tradescantia fluminensis* Vell.) от пылевых частиц, содержащих различные виды бактерий, грибов и актиномицетов, была создана лабораторная испытательная камера (рис. 1). Корпус данной установки был изготовлен из нержавеющей стали и прозрачного оргстекла, объем камеры составил 300 литров. Для создания потока воздуха в испытательную камеру со средней скоростью 0.5 – 1 м/с использовался вентилятор.

Лабораторные эксперименты проводились на модели аппаратно-биологического комплекса рециркуляционного типа (лабораторной испытательной камеры). Конструкция данного комплекса представлена на рис. 1.

Для изучения влияния аэроионов на испытуемые растения модель аппаратно-биологического комплекса насыщали отрицательными или положительными ионами в концентрациях до 200000 ионов на см³. При исследованиях особое вни-

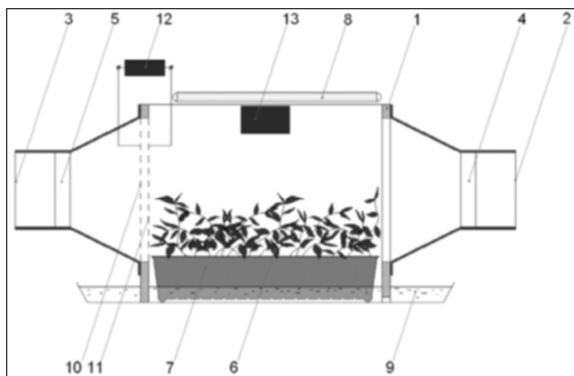


Рис. 1. Испытательная камера для исследования эффективности очистки воздуха от аэрозолей с помощью растений: 1 – бокс, 2 – отверстие для входа воздуха, 3 – отверстие для выхода воздуха, 4 – вентилятор, 5 – биполярный ионизатор, 6 – растения, 7 – цветочные горшки, 8 – светильники, 9 – резервуар для воды, 10, 11 – перфорированная металлическая решетка, 12 – источник постоянного напряжения, 13 – униполярный ионизатор

Fig. 1. Test chamber for studying the efficiency of air purification from aerosols using plants: 1 – a box, 2 – air inlet, 3 – air outlet, 4 – fan, 5 – bipolar ionizer, 6 – plants, 7 – flower pots, 8 – lamps, 9 – water tank, 10, 11 – perforated metal grid, 12 – direct current source, 13 – unipolar ionizer

было обнаружено после первой минуты эксперимента. Все исследования проводились с реальными воздушными потоками, поэтому разброс подсчитанных частиц может превышать 100%.

Микробное загрязнение. Для изучения содержания микроорганизмов используется относительно простой, но очень наглядный метод естественного осаждения Коха. Для исследования эффективности очистных сооружений воздуха разного качества, как содержащему, так и не содержащему аэроионы аэрозольного загрязнения, применяют счетчик частиц.

Анализ Коха – классический метод определения микроорганизмов и спор, сорбируемых и циркулирующих в воздухе частицами пыли. Этот метод использует открытые чашки Петри путем естественного осаждения пылевых частиц спорами микроорганизмов. В связи с экспериментом чашки Петри экспонировались в течение 15 мин в лаборатории на выходящем потоке очищенного воздуха из испытательной камеры с растениями и без них, положительными и отрицательными ионами в конце эксперимента.

Имеющиеся в воздухе микроорганизмы, связанные с частицами пыли, осели на поверхности питательного раствора. Затем чашки Петри закрывали простым

мание уделялось частицам размером 1 – 5 мкм. Генерация ионов осуществлялась непосредственно в камере в воздушном потоке, создаваемом вентилятором и проходящем через зону коронного разряда.

Для каждого исследования восемь образцов паутинника *T. fluminensis* помещали в испытательную камеру. Общая площадь поверхности листьев составляет 48 ± 8 дм².

Дополнительная освещенность растений составляла 1100 лк, а концентрация ионов составляла 200000 ионов на см³.

Количество прошедших через испытательную камеру частиц пыли размером 1 – 5 мкм оценивали с помощью счетчика частиц для входного и выходного воздушного потока. Количество ионов для всех диапазонов рассчитывали в процентах по отношению к базовому значению, которое

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ НА ПОЛИГОНАХ

агаром и переносили в термостат, где инкубировали при 37°C в течение трех суток. По окончании инкубационного периода производили идентификацию и подсчет колоний микроорганизмов. Повторность для каждого опыта равнялась 10. Таким образом, общая сумма измерений составила 40.

Оценка степени очистки зелеными насаждениями. Коэффициент эффективности очистки воздуха растениями зависит от времени. Он рассчитывается по следующему уравнению:

$$K_{\text{эф}} = \frac{N_{\text{вх}} - N_{\text{вых}}}{N_{\text{вх}}} \times 100,$$

где $N_{\text{вх}}$ и $N_{\text{вых}}$ – концентрации аэрозолей соответствующей дисперсности на входе и выходе комплекса.

Подготовительную обработку и анализ данных проводили в приложении Microsoft Office Excel 2010 (Microsoft Corp.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лабораторные эксперименты с испытательной камерой. Результаты изменения концентраций пылевых частиц при различном варьировании условий испытаний и варьировании размеров частиц воздуха от 0.3 – 0.4 до 2 – 5 мкм представлены на рис.2.

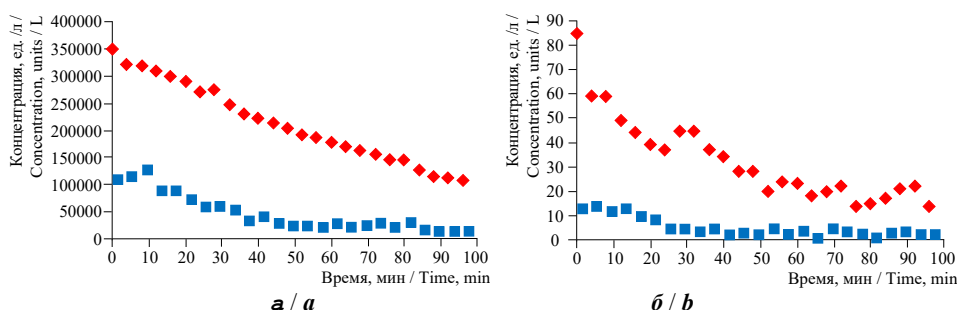


Рис. 2. Изменение концентраций частиц пыли размером 0.3 – 0.4 (а) и 2 – 5 (б) мкм во входном (♦) и выходном (■) потоках воздуха в пустой испытательной камере

Fig. 2. Change in the concentration of dust particles with sizes within 0.3–0.4 (a) and 2–5 (b) μm in the inlet (♦) and outlet (■) air flows in an empty test chamber

Анализ графиков показывает, что концентрации аэрозольных частиц на выходе из комплекса имеют низкие значения, практически стремящиеся к нулю, что однозначно подчеркивает эффективность работы аппаратно-биологического комплекса.

Микробное загрязнение. Также был проведен количественный и качественный анализ бактерий, актиномицетов и мицелиальных грибов в воздухе в выходящем воздушном потоке из испытательной камеры. В таблице показаны сильные различия микробного состава микроорганизмов различных видов в условиях испытаний.

Содержание микроорганизмов в воздухе испытательной камеры

Table. Contents of microorganisms in the air inside the test chamber

Тип микроорганизмов / Type of microorganisms	Содержание микро- бов в камере без растений (контроль) / Content of microbes in the chamber without plants (control)	Содержание микро- организмов в камере с растениями / Con- tent of microorganisms in the chamber with plants	Содержание микроорга- низмов в камере с расте- ниями и при ионизации воздуха / Content of micro- organisms in the chamber with plants and during air ionization
Бактерия / Bacterium	18,2±2.61	7±1.22	10±2.60
Актиномицеты / Actinomycetes	14±1.41	3±0.66	7±2.12
<i>Mucor</i> Fresen., 1850	12±1.52	1±0.08	3±0.76
<i>Penicillium</i> Link, 1809	5±0.72	3±0.55	1±0.26
<i>Cladosporium</i> Link, 1816	3±1.01	1±0.07	1±0.26
<i>Fusarium</i> Link, 1809	2±0.93	1±0.89	1±0.57

Наибольшее количество колоний микроорганизмов подсчитывали в пустой камере. Общая сумма микробных колоний составила в среднем 54 колонии. Минимальное общее количество микроорганизмов, равное 16 колониям, наблюдалось в условиях присутствия растений в тестовой камере.

Наиболее распространенная группа микроорганизмов представлена бактериями в пустой тестовой камерой и составляет в среднем 18.2 за 10 повторностей. Следующие – актиномицеты, которые представлены общим количеством до 14 колоний в пустой тестовой камере. Следует отметить, что среднее количество колоний как бактерий, так и актиномицетов уменьшается вдвое в условиях присутствия растений и при ионизации воздуха. Однако количество бактерий и актиномицетов в условиях присутствия растений уменьшается втрое и составляет соответственно 7 и 3 колонии.

Были определены грибы четырех видов. Мукор представлял собой наиболее способный гриб, и число его колоний равнялось в среднем 12. Однако для камер с растениями и ионизатором его количество сократилось до четырех раз, а для камер с растениями – до двенадцати раз. *Penicillium*, *Cladosporium*, *Fusarium* были представлены 5, 3 и 2 колониями в пустой опытной камере, а их количество уменьшалось до трех раз на каждый род грибов.

Оценка степени очистки зелеными насаждениями. На рис. 2 показаны различия между коэффициентами эффективности, рассчитанными для обоих диапазонов размеров 0.3 – 0.4 и 2 – 5 мкм. Максимальное значение степени эффективности было зарегистрировано в испытательной камере в комплекте с *T. fluminensis*, униполярным ионизатором и блокирующей решеткой и составляет 94 и 97% для размера частиц 0.3 – 0.4 мкм и 2 – 5 мкм соответственно. В условиях испытательной камеры с *T. fluminensis* эффективность очищающей способности снижалась вдвое как для 0.3 – 0.4, так и для 2 – 5 мкм. Кроме того, в течение исследуемого периода коэффициент эффективности был стабилен во всех случаях.

Частицы пыли. В ходе исследований была изучена возможность зеленых насаждений очищать воздух от частиц пыли размером 2 – 5 мкм. Выбранные размеры частиц воздуха использовались в качестве крупных пылевых частиц, способ-

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ НА ПОЛИГОНАХ

ных переносить значительное количество микробного загрязнения и распространяться на полигонах и прилегающих к ним территориях.

Анализ графиков дает возможность предположить наличие тенденции к снижению концентрации пыли в зависимости от размеров поступающих и выводимых частиц в воздушные потоки. Возможно снижение концентрации аэрозолей за счет их прилипания к стенкам камеры и оседания на окружающих предметах. Однако причины такой зависимости, вероятно, связаны с различным химическим составом частиц разного размера, а также с их суммарным зарядом.

На рис. 2 видно, что присутствие растений в тестовой камере приводит к уменьшению концентрации пылевых частиц. Растения фиксируют на своей поверхности пылинки и очищают воздух до 30%.

Таким образом, анализ показывает снижение концентрации пылевых частиц при использовании *T. fluminensis*, униполярного ионизатора и блокадной решетки. Полученные результаты подтверждают эффективность использования биологического метода очистки воздуха, который можно применять в офисных помещениях, расположенных на полигонах, а также в жилых и служебных помещениях промышленных зданий, расположенных вблизи полигонов ТКО.

Микробное загрязнение. Результаты показывают, что испытываемые растения (*T. fluminensis*) в замкнутом объеме испытательной камеры обладают выраженным антибактериальным и противогрибковым действием. Накопление летучих веществ в объеме испытательной камеры в достаточном количестве существенно подавляет жизнеспособность микроорганизмов, присутствующих в воздухе. Эти данные согласуются с данными, полученными в ходе обзора литературы и подтверждают правильность выбора тест-растений. Кроме того, отмечается большая очищающая способность растений, произрастающих в России, от различных видов микробных загрязнений.

При определении наиболее эффективного режима подавления микроорганизмов необходимо учитывать, что фитонцидная активность испытываемых растений зависит от наличия ионов в воздушной камере.

В случае униполярных ионов с высокой концентрацией в тестовой камере происходит зарядка аэрозолей. Аэрозоли за счет электростатического отталкивания начинают интенсивно выноситься из объема камеры на стенки камеры и на листья растений. При контакте пылевого аэрозоля с заземленной металлической стенкой камеры он теряет собственный заряд. Из-за низкой адгезии к металлу эти аэрозоли снова загрязняют воздушную камеру. Этим объясняется отсутствие практического эффекта в камере очистки воздуха в присутствии ионов, но в отсутствие растений.

Так, листья растений имеют хорошо развитую площадь поверхности за счет естественной шероховатости устьиц и т. д., значительно превышающую геометрическую площадь листовой мозаики. Кроме того, аэрозоли, коснувшись поверхности листьев, покрытых воском, прилипают к воску и не возвращаются в воздушную камеру.

Полученные данные свидетельствуют о том, что растения являются природными фильтрами, обладающими способностью очищать воздух полигонов и прилегающих территорий от присутствующего в нем микробиологического загрязне-

ния. Полученные данные были использованы для разработки принципов системы биологической очистки от этого вида загрязнения для системы очистки воздуха внутри помещений.

Инженерное решение по очистке воздуха в помещении. В Санкт-Петербургском политехническом университете разработан вертикальный аппаратно-биологический комплекс рециркуляционного типа (Устройство повышения качества воздуха, 2008). Этот комплекс позволяет эффективно очищать воздух помещений непроизводственных зданий от различного рода загрязняющих веществ.

Очистка воздуха внутри помещений является локальной задачей и может быть решена с помощью инженерных сооружений, именуемых фитомодулями (аппаратно-биологический комплекс). Фитомодуль представляет собой сложное инженерное сооружение, состоящее из различных видов растений с высокой скоростью изменения физико-химического состава воздуха для придания ему определенных свойств и характеристик, а также технических средств, обеспечивающих жизнедеятельность этих растений, контролирующих интенсивность биологических процессов в растениях (фотосинтез, поглощение аэрозольных загрязнителей и др.).

Применение специализированного аппаратно-биологического комплекса поз-

волит снизить микробную нагрузку на внутренние сооружения полигонов и сооружения на их прилегающих территориях.

Функциональная схема аппаратно-биологического комплекса представлена на рис. 3.

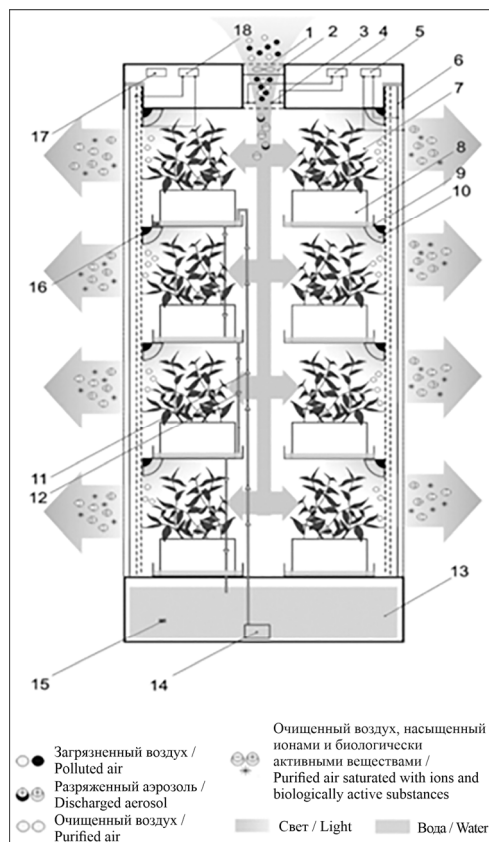


Рис. 3. Функциональная схема аппаратно-биологического комплекса: 1 – воздухозаборник; 2 – вентилятор; 3 – электроды униполярного ионизатора; 4 – источник питания униполярного ионизатора; 5 – источник постоянного напряжения; 6 – электрод биполярного ионизатора; 7 – растения; 8 – цветочные горшки; 9 – планки плантатора; 10 – светодиоды (LED); 11, 12 – водопровод; 13 – резервуар для воды; 14 – насос; 15, 16 – водомерный приемник; 17 – датчик; 18 – удерживающий потенциал

Fig. 3. Functional diagram of the apparatus-biological complex: 1 – air intake; 2 – fan; 3 – electrodes of the unipolar ionizer; 4 – power supply of the unipolar ionizer; 5 – direct current source; 6 – electrode of the bipolar ionizer; 7 – plants; 8 – flower pots; 9 – planter slats; 10 – light-emitting diodes (LED); 11, 12 – plumbing; 13 – water tank; 14 – pump; 15, 16 – water meter receiver; 17 – sensor; 18 – holding potential

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ НА ПОЛИГОНАХ

Загрязненный воздух вентилятором (2) подается в комплекс с установками, находящимися на разных ярусах. Комплекс оборудован несущей вертикальной конструкцией с посадочными площадками, на которых установлены горшки с растениями. Конструкция позволяет осуществлять нижний полив растений. Гипоаллергенные минеральные грунты, используемые в качестве почвы для растений, практически исключают развитие патогенных микроорганизмов на их поверхности. Растения с расширенной функцией транспирации интенсивно освещают энергосберегающими лампами или светодиодными прожекторами (10), в результате чего резко увеличивается выход с поверхности листьев влаги и биологически активных веществ, в том числе фитонцидов.

В верхней части комплекса находится аппаратный модуль. Он обеспечивает работу генератора по выработке биполярных ионов и их удалению в воздухе помещения. Модули управления и контроля обрабатывают информационные данные, поступающие от датчиков и отражающие наличие воды в резервуаре (13) и на одной из посадочных площадок, и вырабатывают команду на очередной полив растений. В нижней части комплекса установлен резервуар для хранения воды.

Воздушный поток внутри комплекса формируется таким образом, чтобы аэрозольные скопления, проходящие через листья растений, осели на них. Влажные листья хорошо удерживают аэрозоли и фитонциды, инактивируют микроорганизмы. Наличие удерживающего потенциала (18) на перфорированных решетках исключает выход заряженных аэрозольных ступков из ограждения. В результате из комплекса выходит очищенный от аэрозольных и микробных загрязнений и увлажненный воздух, богатый биологически активными веществами. Минувя решетки, воздух насыщается легкими ионами в концентрациях по нормативам РФ СанПин 2.2.4.1294-03 и распределяется по помещению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате лабораторных экспериментов были получены нижеописанные результаты.

Тестовые растения (*T. fluminensis*) обладают сильным антибактериальным и противогрибковым действием. Это характеризуется ускоренным снижением микробной обсемененности воздуха.

Имеется теоретическая возможность управлять выделением фитонцидов, а значит, влиять на бактерицидные и фунгицидные свойства растительных комплексов.

Наилучшие результаты по способности очистки воздуха показали испытательные камеры, содержащие установки для снижения аэрозольного загрязнения воздуха с заградительной решеткой и униполярным ионизатором. Возможности очистки воздуха со всеми необходимыми элементами в несколько раз выше, чем в пустой тестовой камере.

Исследования показывают эффективность биологического метода очистки воздуха от микробных загрязнений, поступающих с полигонов в помещения оперативного центра и в жилые и производственные здания, расположенные на прилегающих к ним территориях. Микробное загрязнение связано с выделением биогаза на полигонах и может привести к ослаблению здоровья. Таким образом, ис-

пользование аппаратно-биологических комплексов позволяет снизить негативное влияние на персонал и работников оперативных пунктов и прилегающие территории путем очистки воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аликбаева Л. А., Фигуровский А. П., Васильев О. Д., Ермолаев-Маковский М. А., Меркурьева М. А., Мокроусова О. Н. Изучение микробного загрязнения воздушной среды и оборудования станции биологической очистки промышленных сточных вод // Гигиена и санитария. 2010. № 5. С. 24 – 25.

Масликов В. И., Чусов А. Н., Молодцов Д. В., Рыжакова М. Г. Зональное определение эмиссий биогаза на полигоне ТБО для оценки геоэкологического состояния и обоснования управления процессами разложения отходов при рекультивации // Глобальная энергия. 2012. № 2 (147). С. 260 – 265.

Масликов В. И., Чусов А. Н., Молодцов Д. В. Исследования состава биогаза на полигоне твердых бытовых отходов // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2, № 6. С. 24 – 28. <https://doi.org/10.12737/2158>

Устройство повышения качества воздуха : пат. 82420 Рос. Федерация : МПК, А61L 9/12, 3/12 / Воробьев К. В., Бурцева В. С., Спичкин Г. Л. ; заявитель и патентообладатель Спичкин Георгий Леонидович. № 200813/22 ; заявл. 25.08.2008 ; опубл. 27.04.2009, 14 с.

Цыбуля Н. В., Рычкова Н. А., Дульцева Г. Г., Скубневская Г. И. Изучение возможностей некоторых декоративных растений как фильтров для очистки газовой среды помещений от формальдегида и других карбонильных соединений // Химия в интересах устойчивого развития. 2000. Т. 8, № 6. С. 881 – 884.

Чусов А. Н., Зубкова М. Ю., Кораблев В. В., Масликов В. И., Молодцов Д. В. Технология использования в топливных элементах водородосодержащей смеси на основе биогазов для энергообеспечения автономных потребителей // Глобальная энергия. 2013. № 4 (183). С. 78 – 85.

Albrecht A., Fischer G., Brunneemann-Stubbe G., Jäckel U., Kämpfer P. Recommendations for study design and sampling strategies for airborne microorganisms, MVOC and odours in the surrounding of composting facilities // International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2008. Vol. 211, iss. 1 – 2. P. 121 – 131. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.05.004>

Andrianova M. Ju., Vorobjev K. V., Lednova Ju. A., Chusov A. N. A short-term model experiment of organic pollutants treatment with aquatic macrophytes in industrial and municipal waste waters // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 587 – 589. P. 653 – 656. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.653>

Bünger J., Schappler-Scheele B., Hilgers R., Hallier E. A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants // International Archives of Occupational and Environmental Health. 2007. Vol. 80, iss. 4. P. 306 – 312. <https://doi.org/10.1007/s00420-006-0135-2>

Deportes I., Benoit-Guyod J. L., Zmirou D. Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost // The Science of the Total Environment. 1995. Vol. 172, iss. 2 – 3. P. 197 – 222. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04808-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04808-1)

Douwes J., Thorne P., Pearce N., Heederik D. Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects // The Annals of Occupational Hygiene. 2003. Vol. 47, iss. 3. P. 187 – 2003. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meg032>

Fischer G., Albrecht A., Jäckel U., Kämpfer P. Analysis of airborne microorganisms, MVOC and odour in the surrounding of composting facilities and implications for future investigations // International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2008. Vol. 211, iss. 1 – 2. P. 132 – 142. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.05.003>

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ НА ПОЛИГОНАХ

Gorny R. L., Reponen T., Willeke K., Schmechel D., Robine E., Boissier M., Grinshpun S. A. Fungal fragments as indoor air biocontaminants // *Applied and Environmental Microbiology*. 2002. Vol. 68, № 7. P. 3522 – 3531. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.7.3522-3531.2002>

Grisoli P., Rodolfi M., Villani S., Grignani E., Cottica D., Berri A., Maria Picco A., Dacaro C. Assessment of airborne microorganism contamination in an industrial area characterized by an open composting facility and a wastewater treatment plant // *Environmental Research*. 2009. Vol. 109, iss. 2. P. 135 – 142. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.11.001>

Hargreaves J. C., Adi M. S., Warman P. R. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture // *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2008. Vol. 123, iss. 1 – 3. P. 1 – 14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.004>

Herr C. E. W., zur Nieden A., Jankofsky M., Stilianakis N. I., Boedeker R. H., Eikmann T. F. Effects of bioaerosol polluted outdoor air on airways of residents: a cross sectional study // *Occupational and Environmental Medicine*. 2003. Vol. 60, iss. 5. P. 336 – 342. <https://doi.org/10.1136/oem.60.5.336>

Hung H. F., Kuo Y. M., Chien C. C., Chen C. C. Use of floating balls for reducing bacterial aerosol emissions from aeration in wastewater treatment processes // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 175, iss. 1 – 3. P. 866 – 871. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.090>

Huttunen K., Kaarakainen P., Meklin T., Nevalainen A., Hirvonen M.-R. Immunotoxicological properties of airborne particles at landfill, urban and rural sites and their relation to microbial concentrations // *Journal of Environmental Monitoring*. 2010. Vol. 12, iss. 6. P. 1368 – 1374. <https://doi.org/10.1039/c002579h>

Kalwasinska A., Burkowska A. Municipal landfill sites as sources of microorganisms potentially pathogenic to humans // *Environmental Sciences: Processes and Impacts*. 2013. Vol. 15, iss. 5. P. 1078 – 1086. <https://doi.org/10.1039/c3em30728j>

Kalwasinska A., Burkowska A., Brzezinska M.S. Exposure of workers of municipal landfill site to bacterial and fungal aerosol // *Clean – Soil, Air, Water*. 2014. Vol. 42, iss. 10. P. 1337 – 1343. <https://doi.org/10.1002/clen.201300385>

Le Goff O., Godon J.-J., Milferstedt K., Bacheley H., Steyer J.-P., Wery N. A new combination of microbial indicators for monitoring composting bioaerosols // *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 61. P. 428 – 433. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.081>

Liang R., Xiao P., She R., Han S., Chang L., Zheng L. Culturable airborne bacteria in outdoor poultry-slaughtering facility // *Microbes and Environments*. 2013. Vol. 28, iss. 2. P. 251 – 256. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME12178>

Lis D. O., Ulfvig K., Wlazlo A., Pastuszka J. S. Microbial air quality in offices at municipal landfills // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2004. Vol. 1, iss. 2. P. 62 – 68. <https://doi.org/10.1080/15459620490275489>

Nikaen M., Hatamzadeh M., Hasanzadeh A., Sahami E., Joodan I. Bioaerosol emissions arising during application of municipal solid-waste compost // *Aerobiologia*. 2009. Vol. 25, iss. 1. P. 1 – 6. <https://doi.org/10.1007/s10453-008-9102-6>

Nolasco D., Lima R. N., Hernandez P. A., Perez N. M. Non-controlled biogenic emissions to the atmosphere from Lazareto Landfill, Tenerife, Canary Islands // *Environmental Science and Pollution Research*. 2008. Vol. 15, iss. 1. P. 51 – 60. <https://doi.org/10.1065/espr2007.02.392>

Palmiotto M., Fattore E., Paiano V., Celeste G., Colombo A., Davoli E. Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: Toxicological risk and odor nuisance effects // *Environment International*. 2014. Vol. 68. P. 16 – 24. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.004>

Ryzhakova M. G., Maslikov V. I., Chusov A. N., Korablev V. V. The environmental problem of household hazardous waste generation and treatment // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 675 – 677. P. 761 – 769. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.675-677.761>

Soreanu G., Dixon M., Darlington A. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants – A mini-review // *Chemical Engineering Journal*. 2013. Vol. 229. P. 585 – 594. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.074>

Taha M. P. M., Drew G. H., Longhurst P. J., Smith R., Pollard S. J. T. Bioaerosol releases from compost facilities: Evaluating passive and active source terms at a green waste facility for improved risk assessments // *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40, iss. 6. P. 1159 – 1169. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.010>

Vitezova M., Vitez T. Microbiological characteristics of bioaerosols at the composting plant // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2013. Vol. 61, № 5. P. 1479 – 1485. <https://doi.org/10.11118/actaun201361051479>

Wery N. Bioaerosols from composting facilities – a review // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2014. Vol. 4. Article number 42. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2014.00042>

Zhang H. J., Liu X. H., Wang S. J., Fang L., Zhang L. H. Research on health risk assessment methodologies of municipal solid waste landfill // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 989 – 994. P. 5596 – 5600. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.989-994.5596>

Zhazhkov V. V., Zubkova M. Yu., Maslikov V. I., Molodtsov D. V., Chusov A. N., Semenenko D. V. Model calculation of energy carriers expenses on the basis of biogas in system reformer – fuel cell for autonomous power supply systems // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725 – 726. P. 1602 – 1607.

Zinchenko A. V., Paramonova N. N., Privalov V. I., Reshednikov A. I. Estimation of methane emissions in the St. Petersburg, Russia, region: An atmospheric nocturnal boundary layer budget approach // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2002. Vol. 107, iss. 20. P. ACH 2-1 – ACH 2-11. <https://doi.org/10.1029/2001JD001369>

Zubkova M. Yu., Maslikov V. I., Molodtsov D. V., Chusov A. N. Experimental research of hydrogenous fuel production from biogas for usage in fuel cells of autonomous power supply systems // *Advanced Materials Research*. 2014 a. Vol. 941 – 944. P. 2107 – 2111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2107>

Zubkova M. Yu., Maslikov V. I., Molodtsov D. V., Chusov A. N. The ways assessment of direct production electricity and heat from hydrogenous fuel based on biogas for autonomous consumers // *Applied Mechanics and Materials*. 2014 b. Vol. 587 – 589. P. 330 – 337. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.330>

Indoor air quality assessment on polygons for solid municipal waste for microbial contamination and a method of its cleaning

K. V. Vorobyev¹, A. N. Chusov¹, N. A. Politaeva^{1✉}, A. V. Shchur²

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg 195251, Russia*

*²Belarusian-Russian University
43 Prospekt Mira, Mogilev 212000, Republic of Belarus*

Received: 30 October 2022 / revised: 2 December 2022 / accepted: 2 December 2022

Abstract. Landfill biogas contains large amounts of toxic and harmful impurities and may be a source of microbiological contamination of both the complex municipal waste landfill itself and adjacent territories. This paper uses modern biotechnologies designed to protect the environment, to study the quantitative and qualitative composition of biogas for harmful factors, as well as for harmful substance removal from biogas. An assessment was made of air purification in the premises near landfills and adjacent territories using green plantations and a biological system based on an apparatus-biological complex for purification from microbiological contamination. The data obtained in our laboratory studies show that such apparatus-biological complexes can reduce the negative influence on the personnel and workers at operative points and the inhabitants of adjacent territories by air purification.

Keywords: indoor air, apparatus-biological complex, air purification, microbial pollution, dust particles, landfill, adhesion, *Tradescantia fluminensis*

For citation: Vorobyev K. V., Chusov A. N., Politaeva N. A., Shchur A. V. Indoor air quality assessment on polygons for solid municipal waste for microbial contamination and a method of its cleaning. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 1, pp. 20–36 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-20-36>

REFERENCES

Alikbayeva L. A., Figurowsky A. P., Vasilyev O. D., Yermolayev-Makovsky M. A., Merkur'yeva M. A., Mokrousova O. N. Investigation of microbial contamination of the air and equipment of a biological waste water purification station. *Hygiene and Sanitation*, 2010, no. 5, pp. 24–25 (in Russian).

Maslikov V. I., Chusov A. N., Molodtsov D. V., Ryjakova M. G. The area-based determination of biogas emission from MSW landfill for the geoecological conditions assessment and substantiation of management of waste decomposition in the process of recultivation. *Global Energy*, 2012, no. 2 (147), pp. 260–265 (in Russian).

✉ *Corresponding author.* Higher School of Hydraulic and Power Engineering Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Konstantin V. Vorobyov: <https://orcid.org/0000-0002-8870-5843>, vorobiev_kv@spbstu.ru; Alexander N. Chusov: <https://orcid.org/0000-0002-1388-8649>, chusov_an@spbstu.ru; Natalia A. Politaeva: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>, politaevana1971@gmail.com; Alexander V. Schur: <https://orcid.org/0000-0002-9558-7005>, shchur@yandex.by.

Maslikov V. I., Chusov A. N., Molodtsov D. V. Researches of biogas composition on landfill. *Safety in Technosphere*, 2013, vol. 2, no. 6, pp. 24–28 (in Russian). <https://doi.org/10.12737/2158>

Air Quality Improvement Device. Patent RU 82420 U1. Int. Cl. A61L 9/12, 3/12. Vorobyev K. V., Burtseva V. S., Spichkin G. L.; Proprietor: Georgy L. Spichkin. Application: 200813/22, Published: 25.08.2008, Date of publication 27.04.2009, 14 p. (in Russian).

Tsybulya N. V., Rychkova N. A., Dultseva G. G., Skubnevskaya G. I. Studying the possibilities of some ornamental plants as filters for cleaning the gas-air environment of premises from formaldehyde and other carbonyl compounds. *Chemistry for Sustainable Development*, 2000, vol. 8, no. 6, pp. 881–884 (in Russian).

Chusov A. N., Zubkova M. Yu., Korablev V. V., Maslikov V. I., Molodtsov D. V. The technology of using hydrogen-containing mixtures based on biogas in fuel cells for power supply of autonomous consumers. *Global Energy*, 2013, no. 4 (183), pp. 78–85 (in Russian).

Albrecht A., Fischer G., Brunnemann-Stubbe G., Jäckel U., Kämpfer P. Recommendations for study design and sampling strategies for airborne microorganisms, MVOC and odours in the surrounding of composting facilities. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2008, vol. 211, iss. 1–2, pp. 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.05.004>

Andrianova M. Ju., Vorobjev K. V., Lednova Ju. A., Chusov A. N. A short-term model experiment of organic pollutants treatment with aquatic macrophytes in industrial and municipal waste waters. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 587–589, pp. 653–656. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.653>

Bünger J., Schappler-Scheele B., Hilgers R., Hallier E. A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2007, vol. 80, iss. 4, pp. 306–312. <https://doi.org/10.1007/s00420-006-0135-2>

Deportes I., Benoit-Guyod J. L., Zmirou D. Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost. *The Science of the Total Environment*, 1995, vol. 172, iss. 2–3, pp. 197–222. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04808-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04808-1)

Douwes J., Thorne P., Pearce N., Heederik D. Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2003, vol. 47, iss. 3, pp. 187–2003. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meg032>

Fischer G., Albrecht A., Jäckel U., Kämpfer P. Analysis of airborne microorganisms, MVOC and odour in the surrounding of composting facilities and implications for future investigations. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2008, vol. 211, iss. 1–2, pp. 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.05.003>

Gorny R. L., Reponen T., Willeke K., Schmechel D., Robine E., Boissier M., Grinshpun S. A. Fungal fragments as indoor air biocontaminants. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, vol. 68, no. 7, pp. 3522–3531. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.7.3522-3531.2002>

Grisoli P., Rodolfi M., Villani S., Grignani E., Cottica D., Berri A., Maria Picco A., Dacarro C. Assessment of airborne microorganism contamination in an industrial area characterized by an open composting facility and a wastewater treatment plant. *Environmental Research*, 2009, vol. 109, iss. 2, pp. 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.11.001>

Hargreaves J. C., Adi M. S., Warman P. R. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, vol. 123, iss. 1–3, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.004>

Herr C. E. W., zur Nieden A., Jankofsky M., Stilianakis N. I., Boedeker R. H., Eikmann T. F. Effects of bioaerosol polluted outdoor air on airways of residents: a cross sectional study. *Occupational and Environmental Medicine*, 2003, vol. 60, iss. 5, pp. 336–342. <https://doi.org/10.1136/oem.60.5.336>

Hung H. F., Kuo Y. M., Chien C. C., Chen C. C. Use of floating balls for reducing bacterial aerosol emissions from aeration in wastewater treatment processes. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 175, iss. 1–3, pp. 866–871. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.090>

Huttunen K., Kaarakainen P., Meklin T., Nevalainen A., Hirvonen M.-R. Immunotoxicological properties of airborne particles at landfill, urban and rural sites and their relation to microbial concentrations. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, vol. 12, iss. 6, pp. 1368–1374. <https://doi.org/10.1039/c002579h>

Kalwasinska A., Burkowska A. Municipal landfill sites as sources of microorganisms potentially pathogenic to humans. *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, 2013, vol. 15, iss. 5, pp. 1078–1086. <https://doi.org/10.1039/c3em30728j>

Kalwasinska A., Burkowska A., Brzezinska M. S. Exposure of workers of municipal landfill site to bacterial and fungal aerosol. *Clean – Soil, Air, Water*, 2014, vol. 42, iss. 10, pp. 1337–1343. <https://doi.org/10.1002/clen.201300385>

Le Goff O., Godon J.-J., Milferstedt K., Bacheley H., Steyer J.-P., Wery N. A new combination of microbial indicators for monitoring composting bioaerosols. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 61, pp. 428–433. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.081>

Liang R., Xiao P., She R., Han S., Chang L., Zheng L. Culturable airborne bacteria in outdoor poultry-slaughtering facility. *Microbes and Environments*, 2013, vol. 28, iss. 2, pp. 251–256. <https://doi.org/10.1264/j sme2.ME12178>

Lis D. O., Ulfing K., Wlazlo A., Pastuszka J. S. Microbial air quality in offices at municipal landfills. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2004, vol. 1, iss. 2, pp. 62–68. <https://doi.org/10.1080/15459620490275489>

Nikaeen M., Hatamzadeh M., Hasanzadeh A., Sahami E., Joodan I. Bioaerosol emissions arising during application of municipal solid-waste compost. *Aerobiologia*, 2009, vol. 25, iss. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s10453-008-9102-6>

Nolasco D., Lima R. N., Hernandez P. A., Perez N. M. Non-controlled biogenic emissions to the atmosphere from Lazareto Landfill, Tenerife, Canary Islands. *Environmental Science and Pollution Research*, 2008, vol. 15, iss. 1, pp. 51–60. <https://doi.org/10.1065/espr2007.02.392>

Palmiotto M., Fattore E., Paiano V., Celeste G., Colombo A., Davoli E. Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: Toxicological risk and odor nuisance effects. *Environment International*, 2014, vol. 68, pp. 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.004>

Ryzhakova M. G., Maslikov V. I., Chusov A. N., Korablev V. V. The environmental problem of household hazardous waste generation and treatment. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 675–677, pp. 761–769. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.675-677.761>

Soreanu G., Dixon M., Darlington A. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants – A mini-review. *Chemical Engineering Journal*, 2013, vol. 229, pp. 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.074>

Taha M. P. M., Drew G. H., Longhurst P. J., Smith R., Pollard S. J. T. Bioaerosol releases from compost facilities: Evaluating passive and active source terms at a green waste facility for improved risk assessments. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, iss. 6, pp. 1159–1169. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.010>

Vitezova M., Vitez T. Microbiological characteristics of bioaerosols at the composting plant. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2013, vol. 61, no. 5, pp. 1479–1485. <https://doi.org/10.11118/actaun201361051479>

Wery N. Bioaerosols from composting facilities – a review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2014, vol. 4, article number 42. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2014.00042>

Zhang H. J., Liu X. H., Wang S. J., Fang L., Zhang L. H. Research on health risk assessment methodologies of municipal solid waste landfill. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 989–994, pp. 5596–5600. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.989-994.5596>

Zhazhkov V. V., Zubkova M. Yu., Maslikov V. I., Molodtsov D. V., Chusov A. N., Semenenko D. V. Model calculation of energy carriers expenses on the basis of biogas in system reformer – fuel cell for autonomous power supply systems. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 725–726, pp. 1602–1607.

Zinchenko A. V., Paramonova N. N., Privalov V. I., Reshednikov A. I. Estimation of methane emissions in the St. Petersburg, Russia, region: An atmospheric nocturnal boundary layer budget approach. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2002, vol. 107, iss. 20, pp. ACH 2-1 – ACH 2-11. <https://doi.org/10.1029/2001JD001369>

Zubkova M. Yu., Maslikov V. I., Molodtsov D. V., Chusov A. N. Experimental research of hydrogenous fuel production from biogas for usage in fuel cells of autonomous power supply systems. *Advanced Materials Research*, 2014 a, vol. 941–944, pp. 2107–2111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2107>

Zubkova M. Yu., Maslikov V. I., Molodtsov D. V., Chusov A. N. The ways assessment of direct production electricity and heat from hydrogenous fuel based on biogas for autonomous consumers. *Applied Mechanics and Materials*, 2014 b, vol. 587–589, pp. 330–337. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.330>