

## Методы исследований

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2017

УДК 614.7:628.46/47

Мальшиева А.Г., Козлова Н.Ю., Растяйников Е.Г., Ермаков А.А., Шохин В.А.

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХИМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ СВАЛОЧНОГО ГАЗА НА ПОЛИГОНЕ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» Минздрава России, 119991, Москва

Полигоны и свалки твёрдых бытовых отходов (ТБО) оказывают негативное воздействие на окружающую среду и людей: загрязняются атмосферный воздух, почва, поверхностные и подземные воды. В процессе складирования ТБО в теле полигона в условиях недостатка кислорода, повышенной температуры и влажности происходит естественное анаэробное разложение органических отходов. Одним из продуктов этого процесса является свалочный газ – смесь метана и углекислого газа с небольшим количеством примесей (азот, кремний, сера, сероводород). В качестве примесей в состав свалочного газа входят также десятки и сотни различных органических соединений. Состав и содержание отдельных компонентов в свалочном газе зависит от состава складированных на полигоне отходов. Распространение свалочного газа и неприятного запаха происходит на большие расстояния. Создание, эксплуатация и закрытие полигонов ТБО влечет за собой возникновение ряда экологических проблем, связанных с отнесением полигонов ТБО к вторичным источникам загрязнения окружающей городской среды. Для решения такого рода экологических проблем предлагаются различные варианты «оздоровления», «ремедиации» и защитных мероприятий на территориях размещения полигонов ТБО. На примере полигона ТБО «Тимохово» исследованы эффективность и химическая безопасность применения новой технологии очистки и обезвреживания свалочного газа. В результате работы системы очистки свалочного газа установлено снижение суммарной концентрации загрязняющих соединений, содержания углеводородов (в том числе предельных, ароматических), содержание спиртов, кислородсодержащих и серосодержащих соединений от 63 до 2200 раз. Достигнута 100%-ная очистка от обладающих запахом меркаптанов, сульфидов, ди- и трисульфидов, нафтенных и терпеновых углеводородов и хлорсодержащих соединений. Более чем в 2 раза уменьшилось количество загрязняющих соединений. Однако на выходе из системы очистки идентифицированы необнаруженные на входе соединения, которые можно рассматривать как продукты трансформации при сжигании углеводородов. Хромато-масс-спектрометрические исследования, ориентированные на идентификацию с количественной оценкой компонентов воздушных выбросов до и после новой системы утилизации, позволяют проводить мониторинг выбросов с учётом реального содержания и изменения группового и компонентного состава под влиянием химического воздействия новой технологии и давать рекомендации по дальнейшему совершенствованию установки по очистке выходящих газов с точки зрения экологических аспектов.

**Ключевые слова:** твёрдые бытовые отходы; захоронения; полигоны; свалочный газ; воздействие на окружающую среду; хромато-масс-спектрометрия; загрязняющие вещества; оценка эффективности и безопасности новых технологий.

**Для цитирования:** Мальшиева А.Г., Козлова Н.Ю., Растяйников Е.Г., Ермаков А.А., Шохин В.А. Физико-химические исследования для оценки химической безопасности и эффективности применения новой системы очистки свалочного газа на полигоне твердых бытовых отходов. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(11): 1103-1108. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1103-1108>

**Для корреспонденции:** Мальшиева Алла Георгиевна, д-р биол. наук, проф., рук. лаб. физико-химических исследований ФГБУ «Научно-исследовательский институт экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина» Минздрава России, 119992, Москва. E-mail: [fizhim@yandex.ru](mailto:fizhim@yandex.ru)

Malysheva A.G., Kozlova N.Yu., Rastyannikov E.G., Ermakov A.A., Shokhin V.A.

### PHYSICO-CHEMICAL INVESTIGATIONS FOR THE ASSESSMENT OF THE CHEMICAL SAFETY AND EFFICACY OF APPLICATION OF A NEW SYSTEM OF LANDFILL GAS PURIFICATION AT THE SOLID DOMESTIC GARBAGE DUMP

Center for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks, Moscow, 119991, Russian Federation

Landfills of municipal solid waste (MSW) have a negative impact on the environment and people: air, soil, surface water and groundwater are polluted. During the storage of MSW in the body of the landfill natural anaerobic decomposition of organic waste takes place under conditions of oxygen lack, high temperature and humidity. One product of this process is landfill gas – a mixture of methane and carbon dioxide with small amounts of impurities (nitrogen, silicon, sulfur, hydrogen sulfide). Tens and hundreds of different organic compounds are also included as a compound of landfill gas. The composition and content of the individual components in landfill gas depends on the composition of landfilled waste at the solid domestic garbage dump. The landfill gas and odor run to great distances. Construction, operation and closure of landfills give rise to a number of environmental problems associated with such a classification of landfills as a secondary source of pollution of the urban environment. The solution of such environmental problems offers a variety of options for the “recovery”, “remediation” and protective measures in areas of placement of landfills. For example, in the landfill “Timokhovo” there were studied the efficacy and safety of a new chemical treatment technologies and disposal of landfill gas. As a result of the installation of the system for landfill gas purification there was established the decline in the total concentration of polluting compounds, as hydrocarbons (including saturated and aromatic), alcohols, oxygen and sulfur containing compounds by from 63 to 2200 times. There was reached 100% disposal of mercaptanes, sulfides, di- and trisulfides, naphthenic and

*terpenic hydrocarbons and chlorinated compounds. The number of identified compounds was reduced by more than 2 times. However, at the output of the purification system there were revealed compounds not identified at the input of this system. It can be regarded due to the appearance of transformation products of flaring hydrocarbons. Gas chromatography-mass spectrometry studies directed to the identification with quantitative assessment of air emissions before and after the new system of utilization allow both perform monitoring emissions taking into account the real content and changes in group and component structure under the influence of the chemical impact of the new technologies and make recommendations for further improvement of gas purification systems in terms of environmental aspects.*

**Keywords:** *municipal solid waste; landfills; landfill gas; impact on the environment; gas chromatography-mass spectrometry; contaminants; the evaluation of the effectiveness and the safety of new technologies*

**For citation:** Malysheva A.G., Kozlova N.Yu., Rastyannikov E.G., Ermakov A.A., Shokhin V.A. Physico-chemical investigations for the assessment of the chemical safety and efficacy of application of a new system of landfill gas purification at the solid domestic garbage dump. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2017; 96(11): 1103-1108. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1103-1108>

**For correspondence:** Alla G. Malysheva, MD, PhD, DSci., Prof., head of the laboratory of physical and chemical research of the Center for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks, Moscow, 119991, Russian Federation. E-mail: [fizhim@yandex.ru](mailto:fizhim@yandex.ru)

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgment:** The study had no sponsorship.

Received: 14 February 2017

Accepted: 05 July 2017

## Введение

В последние годы уделяется большое внимание проблеме обращения с отходами и их утилизации, которые в полной мере не решены ни в одной из стран мира [1–3]. Проблема отходов в России особо актуальна: ежегодно в стране образуется более 60 млн тонн твердых бытовых отходов (ТБО). Объемы этих отходов растут из года в год и в значительной мере зависят от масштабов города, численности его населения, особенностей сосредоточенных в нём производств. Только в Москве ежегодно образуется около 5 млн тонн ТБО, которые идут на захоронение или попросту сваливаются, в основном на территории Московской области. В настоящее время широко используется захоронение ТБО как один из основных видов утилизации отходов. Этот способ утилизации наиболее эффективен в тех случаях, когда переработка отходов для вторичного использования опасна или невозможна. Захоронение отходов проводится на специально оборудованных полигонах, представляющих собой сложные объекты, которые являются природоохранными сооружениями, предназначенными для централизованного сбора, обезвреживания и захоронения ТБО.

Негативное воздействие традиционных полигонов и свалок на окружающую среду и людей совершенно очевидно: загрязняются атмосферный воздух, почва, поверхностные и подземные воды. В процессе складирования ТБО в теле полигона в условиях недостатка кислорода, повышенной температуры и влажности происходит естественное анаэробное разложение органических отходов. Одним из продуктов этого процесса является свалочный газ – смесь метана и углекислого газа в средней концентрации 50–65 и 35–50% соответственно с небольшим количеством примесей (азот, кремний, сера, сероводород). В качестве примесей в состав свалочного газа могут входить десятки и сотни различных органических соединений. Состав и содержание отдельных компонентов в свалочном газе зависит от состава складированных на полигоне отходов. Распространение свалочного газа и неприятного запаха происходит на большие расстояния.

Следовательно, создание, эксплуатация и закрытие полигонов ТБО влечёт за собой возникновение ряда экологических проблем, связанных с отнесением полигонов ТБО к вторичным источникам загрязнения окружающей городской среды. Для решения такого рода экологических проблем предлагаются различные варианты «оздоровления», «ремедиации» и защитных мероприятий на территориях размещения полигонов ТБО, в том числе дорогостоящие технологии обработки фильтрата, системы мониторинга состояния полигонов ТБО и т. д. [4].

В то же время полигоны и свалки ТБО одновременно могут являться источником ископаемого топлива [5–7]. Так, полигон ТБО «Тимохово» в Московской области – один из немногих примеров перехода полигона к экологически безопасному воз-

обновляемому источнику энергии с помощью новой технологии улавливания и обезвреживания свалочного газа.

Внедрение новой технологии очистки и обезвреживания выбросов полигона «Тимохово» проходило в несколько этапов. На первом этапе на полигоне был возведен специальный защитный экран, состоящий из песчано-глинистого грунта. На втором этапе была возведена система сбора и очистки фильтрата. С её помощью с 2009 по 2015 гг. удалось очистить 438 тыс. м<sup>3</sup> фильтрата. Фильтрат – это жидкость, загрязнённая органическими и неорганическими веществами, собирающаяся на дне чаши размещения отходов полигона ТБО. В 2014 г. на полигоне была построена система сбора и обезвреживания свалочного газа, являющегося побочным продуктом бескислородного разложения органических веществ муниципальных отходов, который более чем в 20 раз опаснее для населения, чем углекислый газ. Система сбора и обезвреживания свалочного газа включает в себя компрессорную и факельную установки для обезвреживания свалочного газа. В результате реализации проекта удалось нейтрализовать неприятные запахи и сократить выбросы вредных веществ (по углекислому газу). Впоследствии разработчиками этой технологии благодаря реализации всех этапов модернизации программы очистки и обезвреживания выбросов полигона запланировано преобразование свалочного газа в электроэнергию.

Отметим, что одним из актуальных направлений физико-химических исследований в гигиене к настоящему времени стала оценка опасности или безопасности химического воздействия новых технологий на здоровье населения и поиск оптимальных, с точки зрения эколого-гигиенических аспектов, условий их применения [8, 9]. Однако не все новейшие технологии могут быть химически безопасными с позиции возможного образования под влиянием физико-химических факторов, лежащих в основе новой технологии, целого букета побочных токсичных продуктов трансформации веществ, входящих в состав выбросов [10, 11]. К настоящему времени актуальной проблемой продолжает оставаться недоучёт процессов трансформации веществ при мониторинге в реальных условиях загрязнения окружающей среды. Наши исследования объектов окружающей среды в различных регионах показали, что пробы воздуха, воды, почвы часто содержали неучтённые в технологических выбросах вещества в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК). Если при контроле ориентироваться только на исходные вещества, заявленные в выбросах, то при отсутствии их, в частности, в атмосферном воздухе жилой зоны или обнаружении в незначительных концентрациях, можно сделать ошибочный вывод о ситуации экологического благополучия, так как не учитывается тот факт, что при трансформации можно получить новый «букет» загрязнений, среди которых возможно присутствие веществ более токсичных или опасных, чем исходные.

В качестве примера продемонстрируем опасность недоучёта результатов химико-аналитических исследований, направленных на идентификацию широкого спектра веществ, поступающих в окружающую среду от полигона ТБО, и гигиенической оценки эффективности и химической безопасности применения технологии сбора, очистки, обезвреживания и утилизации свалочного газа. Целью наших исследований являлись физико-химические исследования методом хромато-масс-спектрометрии для оценки эффективности и химической безопасности применения новой технологии очистки и обезвреживания свалочного газа.

## Материал и методы

Исследования свалочного газа выполнены с использованием хромато-масс-спектрометрической системы Thermo Fisher Scientific, включающей газовый хроматограф Focus GC с полным электронным контролем газовых потоков и режимом цифрового контроля давления и потоков с автоматическим определением параметров колонки, масс-спектрометрический детектор DSQ II с квадрупольным масс-анализатором, обеспечивающий измерения в диапазоне массовых чисел от 1 до 1050, термодесорбер 9300 АСЕМ с криофокусированием газовой пробы. Система имеет программное обеспечение, контролирующее работу всего прибора, который обеспечивает сбор, хранение всех масс-спектров в процессе проведения хромато-масс-спектрометрического анализа, обработку результатов измерений, количественный анализ, поиск и сравнение с библиотекой масс-спектров NIST 08, включающей более 220 тыс. спектров для более 190 тыс. соединений с их химическими структурами.

Пробы свалочного газа отобраны в трубки, заполненные сорбентом Терах ТА с использованием 4-канального электрического аспирационного устройства ПУ-4Э. Местами отбора являлся трубопровод на входе (при температуре 30 °С) и на выходе из системы очистки (обезвреживания) (при температуре 18 °С). Объём газовой пробы составляет 4,2 дм<sup>3</sup> при скорости аспирирования 0,3 дм<sup>3</sup>/мин.

Хромато-масс-спектрометрический анализ выполняли при следующих условиях:

1. Термодесорбция:
  - температура восьмифазового клапана – 150 °С;
  - температура интерфейса – 200 °С;
  - температура фокусирующей трубки – 200 °С;
  - время нагрева фокусирующей трубки – 2 мин.;
  - температура отдувки сорбционной трубки – 280 °С;
  - температура сорбционной трубки – 280 °С;
  - время нагрева сорбционной трубки – 5 мин.;
  - время охлаждения сорбционной трубки – 2 мин.;
  - температура криофокусировки – 10 °С;
  - объёмная скорость гелия через сорбционную трубку – 20 см<sup>3</sup>/мин.
2. Газохроматографическое разделение:
  - колонка хроматографическая капиллярная из кварцевого стекла DB-5 с внутренним диаметром 0,32 мм и длиной 60 м с неподвижной метилсилоксановой фазой (5% фенилметилполисилоксан), толщина плёнки 1 мкм;
  - начальная температура термостата колонки – 33 °С;
  - временное плато начальной температуры термостата колонки – 3 мин.;
  - скорость подъёма температуры термостата колонки – 6°/мин.;
  - промежуточная температура термостата колонки – 60 °С;
  - временное плато промежуточной температуры термостата колонки – 0 мин.;
  - скорость подъёма температуры термостата колонки – 6,5°/мин.;
  - конечная температура термостата колонки – 250 °С;
  - временное плато конечной температуры термостата колонки – 3 мин.;
  - объёмная скорость гелия через колонку – 1,5 см<sup>3</sup>/мин.
3. Масс-селективное детектирование:
  - температура ионного источника – 200 °С;

- ток детектора – 300000;
- режим сканирования:
  - время до начала сканирования – 4,3 мин.;
  - диапазон сканирования – 41–260;
  - время анализа – 41 мин.

## Результаты и обсуждение

Результаты определения обнаруженных органических веществ на входе и выходе из системы обезвреживания свалочного газа приведены в таблице. Кроме того, в таблице для сравнения представлены также гигиенические нормативы веществ, обнаруженных на выходе из системы обезвреживания, в атмосферном воздухе (ПДК<sub>м.р.</sub> и ОБУВ) и воздухе рабочей зоны (ПДК<sub>р.з.</sub>), приведённые в [12–14].

На входе в систему очистки (обезвреживания) свалочного газа идентифицировано 72 органических соединения, принадлежащих к различным классам органических веществ: углеводородам, в том числе предельным, непредельным, циклическим (нафтеновым), ароматическим, полициклическим, терпеновым и кислородсодержащим соединениям, включающим спирты, фенолы, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, сложные эфиры, фталаты, а также серо-, хлор- и азотсодержащим соединениям. Суммарное содержание обнаруженных веществ составило 46,08 мг/м<sup>3</sup>. Основная часть в составе свалочного газа принадлежала углеводородам (71%) и кислородсодержащим соединениям (21%). Серосодержащие соединения составили 6%, хлорсодержащие – 2%. Углеводородный состав представлен предельными (29%), нафтеновыми (25%), ароматическими (11%), терпеновыми (4%), полициклическими ароматическими (0,2%) соединениями. Кислородсодержащие соединения представлены, в основном, кетонами (10%) и спиртами (7%). Серосодержащие соединения представлены меркаптанами, сульфидами, ди- и трисульфидами. Идентифицированы также хлорсодержащие соединения.

На выходе из системы очистки (обезвреживания) свалочного газа идентифицировано 30 органических соединений, суммарное содержание которых составило 0,73 мг/м<sup>3</sup>. Состав биогаза на выходе из системы представлен кислородсодержащими соединениями (89%), углеводородами (4%), серо- и азотсодержащими соединениями – 4 и 3% соответственно.

На рис. 1 приведены результаты оценки эффективности работы системы очистки по групповому составу. Так, в результате работы системы очистки свалочного газа установлено, что уменьшились:

- суммарная концентрация загрязняющих соединений – в 63 раза,
- содержание углеводородов – в 1100 раз,
- содержание предельных углеводородов – в 2200 раз,
- содержание ароматических углеводородов – в 216 раз,
- суммарная концентрация кислородсодержащих соединений – в 15 раз,
- содержание спиртов – в 650 раз,
- концентрация серосодержащих соединений – в 84 раза.

Кроме того, достигнута 100%-ная очистка от меркаптанов, сульфидов, ди- и трисульфидов, нафтеновых и терпеновых углеводородов и хлорсодержащих соединений.

На рис. 2 приведены результаты оценки химической безопасности системы очистки по компонентному составу.

В результате работы системы очистки количество идентифицированных веществ уменьшилось в 2,4 раза. Однако на выходе из системы очистки идентифицированы не обнаруженные на входе соединения, которые можно рассматривать как продукты трансформации при сжигании углеводородов. Так, идентифицированы: серо- и хлорсодержащее соединение (метилсульфохлорид), стирол, 1-бутанол, фенол, альдегиды (гексаналь, нонаналь, безальдегид, бензальдегид), ацетофенон и карбоновые кислоты (уксусная, пропионовая, бутановая, гексановая, октановая, бензойная), фталевый ангидрид, диизобутилфталат, диоксан, 4-метил-2,3-дигидропиран и азотсодержащие соединения (ацетонитрил и оксим бензальдегида).

**Органические соединения, идентифицированные в выбросах до и после системы очистки свалочного газа на полигоне ТБО «Тимохово» (Московская обл., Ногинский район)**

Органическое соединение	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>		Гигиенический норматив, мг/м <sup>3</sup>		
	свалочный газ (вход в систему очистки)	газ в факельном выбросе (выход из системы очистки)	ПДК <sub>м.р.</sub>	ОБУВ	ПДК <sub>р.з.</sub>
<b>Углеводороды и их изомеры,</b>	<b>32,99</b>	<b>0,029</b>	–	–	–
<b>в том числе предельные:</b>	<b>13,24</b>	<b>0,006</b>	–	–	–
Пентан	0,66	–	н/у	н/у	ΣC <sub>1</sub> –C <sub>10</sub> = 300
Гексан	2,41	–	60	–	
Гептан	4,01	0,002	–	1,5	–
Октан	3,66	0,004	н/у	н/у	–
Нонан	1,88	–	н/у	н/у	–
Декан	0,38	–	н/у	н/у	–
Ундекан	0,20	–	н/у	н/у	–
Додекан	0,04	–	ΣC <sub>12</sub> –C <sub>19</sub> = 1	–	–
<b>непредельные:</b>	<b>1,19</b>	–	–	–	–
Метилбутены	0,76	–	н/у	н/у	–
Метилпентен	0,08	–	н/у	н/у	–
Метилгексен	0,07	–	н/у	н/у	–
Гептен-2	0,08	–	н/у	н/у	–
Диметилуктен	0,05	–	н/у	н/у	–
Ундецен	0,04	–	н/у	н/у	–
1,4-Пентадиен	0,09	–	н/у	н/у	–
2,4-Гексадиен	0,02	–	н/у	н/у	–
<b>циклические (нафтеновые):</b>	<b>11,74</b>	–	–	–	–
Циклопентен	0,09	–	–	0,1	–
Метилциклопентан	0,67	–	н/у	н/у	–
Циклогексан	1,10	–	1,4	–	–
Диметилциклопентан	0,59	–	н/у	н/у	–
Метилциклогексан	0,86	–	н/у	н/у	–
Этилциклопентан	0,66	–	н/у	н/у	–
Триметилциклопентан	0,21	–	н/у	н/у	–
Диметилциклогексан	1,34	–	н/у	н/у	–
Метилэтилциклопентан	0,42	–	н/у	н/у	–
Этилциклогексан	2,02	–	н/у	н/у	–
Триметилциклогексан	2,91	–	н/у	н/у	–
Метилэтилциклогексан	0,62	–	н/у	н/у	–
Тетраметилциклогексан	0,17	–	н/у	н/у	–
Ментан	0,06	–	н/у	н/у	–
Метилпропилциклогексан	0,02	–	н/у	н/у	–
<b>терпеновые:</b>	<b>1,75</b>	–	–	–	–
Трициклен	0,05	–	н/у	н/у	–
α-Пинен	0,94	–	н/у	н/у	–
Камфен	0,23	–	н/у	н/у	–
β-Пинен	0,14	–	н/у	н/у	–
Карен	0,23	–	н/у	н/у	–
Лимонен	0,16	–	н/у	н/у	–
<b>ароматические:</b>	<b>4,97</b>	<b>0,023</b>	–	–	–
Бензол	0,93	0,001	0,3	–	5
Толуол	1,06	0,003	0,6	–	50
Этилбензол	0,72	0,010	0,02	–	50
м-, п-Ксилолы	0,45	0,003	0,04	–	н/у
о-Ксилон	0,84	0,002	0,3	–	н/у
Изопропилбензол	0,20	–	н/у	н/у	–
н-Пропилбензол	0,08	–	н/у	н/у	–
Метилэтилбензол	0,10	–	н/у	н/у	–
Триметилбензол	0,24	–	0,04	–	–
Метилизо-пропилбензол	0,31	0,002	–	0,03	н/у
Метил-н-пропилбензол	0,04	–	н/у	н/у	–
Стирол	–	0,002	0,04	–	10
<b>полициклические ароматические (ПАУ):</b>	<b>0,10</b>	–	–	–	–
Декагидронафталин	0,10	–	н/у	н/у	–

Продолжение табл. на стр. 1107

Органическое соединение	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>		Гигиенический норматив, мг/м <sup>3</sup>		
	свалочный газ (вход в систему очистки)	газ в факельном выбросе (выход из системы очистки)	ПДК <sub>м.р.</sub>	ОБУВ	ПДК <sub>р.з.</sub>
<b>Кислородсодержащие соединения, в том числе:</b>	<b>9,65</b>	<b>0,646</b>			
<b>спирты:</b>	<b>3,23</b>	<b>0,005</b>			
Изопропанол	1,36	–	0,3	–	–
трет-Бутанол	0,92	–	0,6	–	–
1-Бутанол	–	0,005	0,10	–	10
2-Бутанол	0,95	–	н/у	н/у	–
<b>фенолы:</b>	<b>–</b>	<b>0,009</b>			
Фенол	–	0,009	0,01	–	0,3
<b>альдегиды:</b>	<b>–</b>	<b>0,093</b>			
Гексаналь	–	0,008	0,02	–	н/у
Нонаналь	–	0,007	0,02	–	н/у
Бензальдегид	–	0,073	0,04	–	н/у
Бензацетальдегид	–	0,005	н/у	н/у	н/у
<b>кетоны:</b>	<b>4,82</b>	<b>0,165</b>			
Ацетон	1,85	0,023	0,35	–	200
2-Бутанон	2,21	–	–	0,1	–
Метилбутанон	0,76	–	0,1	0,1	–
Ацетофенон	–	0,142	0,010*	–	5
<b>карбоновые кислоты:</b>	<b>–</b>	<b>0,354</b>			
Уксусная	–	0,207	0,2	–	н/у
Пропионовая	–	0,010	0,015	–	20
Бутановая	–	0,003	0,015	–	20
Гексановая	–	0,039	0,01	–	5
Октановая	–	0,006	н/у	н/у	н/у
Бензойная	–	0,070	–	0,03	5
Фталевый ангидрид	–	0,019	0,1	–	н/у
<b>сложные эфиры:</b>	<b>0,07</b>	<b>–</b>			
Метилбутират	0,07	–	–	0,05	–
<b>фталаты:</b>	<b>–</b>	<b>0,004</b>			
Диизобутилфталат	–	0,004	н/у	н/у	–
<b>другие:</b>	<b>1,53</b>	<b>0,016</b>			
Метилфураны	0,45	–	н/у	н/у	–
Тetraгидрофуран	0,50	–	н/у	н/у	–
2,5-Диметилфуран	0,58	–	н/у	н/у	–
Диоксан	–	0,009	н/у	н/у	10
4-Метил-2,3-дигидропиран	–	0,007	н/у	н/у	н/у
<b>серосодержащие соединения:</b>	<b>2,59</b>	<b>0,031</b>			
Этилмеркаптан	0,15	–	$5 \cdot 10^{-5}$	–	–
Сероуглерод	0,14	–	0,03	–	–
Изопропенилмеркаптан	0,87	–	н/у	н/у	–
н-Пропилмеркаптан	0,30	–	$1,5 \cdot 10^{-4}$	–	–
втор-Бутилмеркаптан	0,73	–	н/у	н/у	–
Пропил-втор-бутилдисульфид	0,06	–	н/у	н/у	–
Пропил-н-бутилдисульфид	0,12	–	н/у	н/у	–
Ди-втор-бутилдисульфид	0,05	–	н/у	н/у	–
Ди-пропилтрисульфид	0,07	–	н/у	н/у	–
Пропилбутилтрисульфид	0,10	–	н/у	н/у	–
Метилсульфохлорид CH <sub>3</sub> ClO <sub>2</sub> S	–	0,031	н/у	н/у	н/у
<b>хлорсодержащие соединения:</b>	<b>0,85</b>	<b>–</b>			
1,2-Дихлорэтилен	0,71	–	н/у	н/у	–
1,2-Дихлорпропан	0,03	–	ПДК <sub>с.с.</sub> = 0,18	–	–
Тетрахлорэтилен	0,11	–	0,5	–	–
<b>азотсодержащие вещества:</b>	<b>–</b>	<b>0,021</b>			
Ацетонитрил	–	0,010	–	0,1	0,1
Оксим бензальдегида	–	0,011	н/у	н/у	н/у
<b>Всего соединений</b>	<b>72</b>	<b>30</b>			
Суммарная концентрация загрязняющих соединений, мг/м <sup>3</sup>	<b>46,08</b>	<b>0,73</b>			

Примечание. \* – ГН 2.1.6.2498–09 (дополнение 7 к ГН 2.1.6.13338–03); н/у – не установлен.

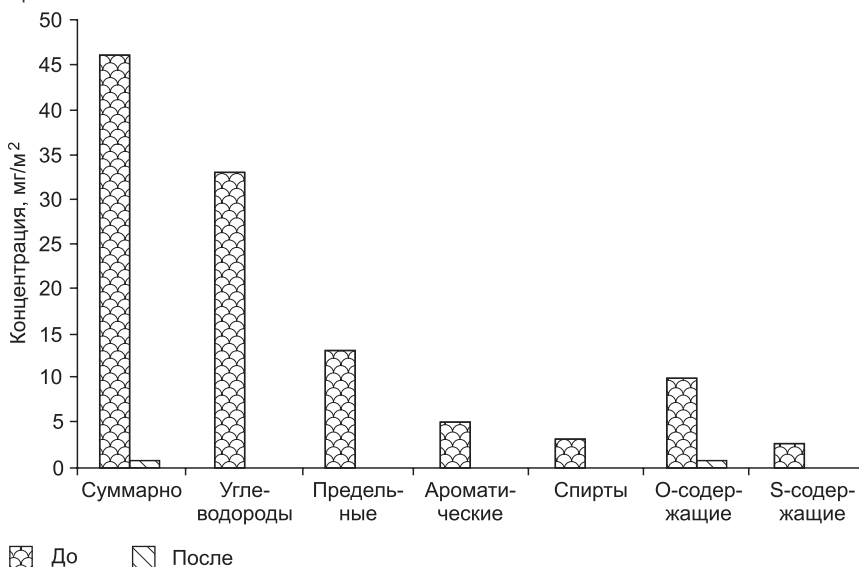


Рис. 1. Эффективность очистки свалочного газа (по групповому составу).

Химическая безопасность применения технологии очистки свалочного газа (по количественному составу)

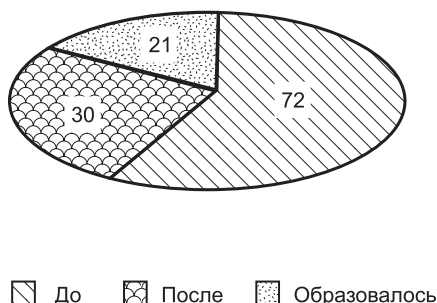


Рис. 2. Химическая безопасность применения технологии очистки свалочного газа (по количественному составу).

## Заключение

Несмотря на то что за последние 5 лет полигон «Тимохово» успешно прошёл путь от обычного полигона по захоронению ТБО до современного энергетического комплекса на основе возобновляемых источников энергии, наши исследования, направленные на идентификацию с количественной оценкой компонентов воздушных выбросов до и после новой системы утилизации, позволили проводить мониторинг выбросов с учётом реального содержания и изменения группового и компонентного состава под влиянием химического воздействия новой технологии и дать рекомендации по дальнейшему совершенствованию установки по очистке выходящих газов полигона с точки зрения экологических аспектов. Такие исследования и последующие рекомендации будут способствовать сохранению здоровья населения близлежащих к полигонам районов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература (п.п. 2, 3 см. References)

- Петров В.В., Гусева А.Ю., Гусакова Н.В., Воробьев Д.М. Обеспечение функционирования городской системы экологического мониторинга данных по обращению с отходами производства и потребления в г. Таганроге. *Инженерный вестник Дона*. 2012; (4-2). Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1350/>
- Шейна С.Г., Бабенко Л.Л., Неделько С.С., Кобалия Н.Б. Система управления твёрдыми бытовыми отходами с использованием ГИС-технологий. *Инженерный вестник Дона*. 2012; (4-2). Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1258/>

- Центр стратегических исследований топливно-энергетического комплекса Дальнего Востока. Аналитическая записка. «Энергетический потенциал свалочного газа на полигонах ТБО». Available at: <http://fecsrfec.ru/upload/iblock/488/488126c7a984fc266ebb2400c8257acb.pdf>
- Гурвич В.И., Лифшиц А.Б. Добыча и утилизация свалочного газа (СГ) – самостоятельная отрасль мировой индустрии. *Экологические системы*. 2005; (5).
- Дедиков Д.С. Доклад «Перспективы использования источников альтернативной энергии (на примере свалочного газа и атомной энергии)». Available at: [http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VIII\\_forum\\_2013/Dedikova\\_D.S.pdf](http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VIII_forum_2013/Dedikova_D.S.pdf)
- Мальшова А.Г., Растяников Е.Г., Беззубов А.А., Козлова Н.Ю., Баева И.В., Абрамов Е.Г. Аналитические исследования при оценке безопасности и эффективности новых технологий в медицине окружающей среды. *Гигиена и санитария*. 2006; 85(1): 32–4.
- Мальшова А.Г., Рахманин Ю.А., Растяников Е.Г., Козлова Н.Ю., Артюшина И.Ю., Шохин В.А. Хромато-масс-спектрометрическое исследование летучих выделений растений для оценки эффективности и химической безопасности применения средоулучшающих фитотехнологий. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(6): 501–7.
- Мальшова А.Г. Закономерности трансформации органических соединений в окружающей среде. *Гигиена и санитария*. 1997; 76(3): 5–10.
- Мальшова А.Г., Рахманин Ю.А. *Физико-химические исследования и методы контроля веществ в гигиене окружающей среды*. СПб.: Профессионал; 2012.

## References

- Petrov V.V., Guseva A.Yu., Gusakova N.V., Vorob'ev D.M. The ensuring of the functioning of urban environmental data monitoring system for the management of production and consumption waste in Taganrog. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2012; (4-2). Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1350/> (in Russian)
- Hong J., Li X., Zhaojie C. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. *Waste Manag.* 2010; 30(11): 2362–9.
- Bovea M.D., Ibáñez-Forés V., Gallardo A., Colomer-Mendoza F.J. Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Manag.* 2010; 30(11): 2383–95.
- Sheina S.G., Babenko L.L., Nedel'ko S.S., Kobaliya N.B. The control system of solid household waste using GIS-technologies. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2012; (4-2). Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1258/> (in Russian)
- Center for Strategic Studies of the Fuel and Energy Complex of the Far East. Analytic note. «The energy potential of landfill gas at landfills». Available at: <http://fecsrfec.ru/upload/iblock/488/488126c7a984fc266ebb2400c8257acb.pdf> (in Russian)
- Gurvich V.I., Lifshits A.B. Production and utilization of landfill gas – the independent sector of World industry. *Ekologicheskie sistemy*. 2005; (5). (in Russian)
- Dedikov D.S. Report «Prospects for the use of alternative energy sources (the example of the landfill gas and nuclear energy)». Available at: [http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VIII\\_forum\\_2013/Dedikova\\_D.S.pdf](http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VIII_forum_2013/Dedikova_D.S.pdf) (in Russian)
- Malysheva A.G., Rastyannikov E.G., Bezzubov A.A., Kozlova N.Yu., Baeva I.V., Abramov E.G. Analytical studies of assessing the safety and efficacy of new technologies in Environmental Medicine. *Gigiya i sanitariya*. 2006; 85(1): 32–4. (in Russian)
- Malysheva A.G., Rakhmanin Yu.A., Rastyannikov E.G., Kozlova N.Yu., Artyushina I.Yu., Shokhin V.A. Gas chromatography-mass spectrometry's study of volatile plant discharge to evaluate the efficacy and safety of the environmental phytotechnologies' improvement. *Gigiya i sanitariya*. 2016; 95(6): 501–7. (in Russian)
- Malysheva A.G. Regularities of the transformation of organic compounds in the environment. *Gigiya i sanitariya*. 1997; 76(3): 5–10. (in Russian)
- Malysheva A.G., Rakhmanin Yu.A. *The Physical and Chemical Studies and Methods of Substances Control in the Environmental Hygiene [Fiziko-khimicheskie issledovaniya i metody kontrolya veshchestv v gigiyene okruzhayushchey sredy]*. St. Petersburg: Professional; 2012. (in Russian)

Поступила 14.02.2017

Принята к печати 05.07.2017