

Совершенствование системы обращения с отходами в РФ

DOI: 10.34828/UdSU.2024.27.59.007

УДК 502

М.В. Графкина, В.В. Семенов, В.И. Жданов

СПОСОБ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ МУСОРНЫХ СВАЛОК И ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Аннотация. В России за последние пять лет ликвидировано 128 крупных свалок в городах и продолжается дальнейшая работа по ликвидации объектов накопленного экологического вреда и точек высокого экологического риска. Выбор способа утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) зависит от многих факторов, в том числе от морфологического состава и физических свойств отходов. В настоящее время существует несколько способов утилизации ТКО, среди которых и термическая утилизация. Анализ опубликованных научных и научно-технических источников показал наличие различных способов термической утилизации отходов различного агрегатного состояния, среди них и установки для «безотходной» утилизации ТКО для небольших населенных пунктов. Выявлены также недостатки существующих способов термической утилизации ТКО, установлено, что для термической утилизации диоксинов и фуранов необходимо, чтобы продукты сгорания находились в зоне горения с температурой 1000 °С в течение не менее 4-5 сек. Для совершенствования термической утилизации ТКО были разработаны и защищены патентами: мобильная печь с перегородкой для создания двухзонного горения, мобильная двухзонная печь, печь с двухзонным двухстадийным горением. Приведены расчеты, представлены результаты испытания опытной установки. Показана возможность использования данного способа термической утилизации ТКО и водных растворов токсичных веществ в малонаселенных пунктах для ликвидации объектов накопленного экологического вреда.

Ключевые слова: объекты накопленного экологического вреда, термическая утилизация отходов, токсичные вещества, печи с двухзонным горением, газожидкостные форсунки, факел распыления.

Для цитирования: Графкина М.В., Семенов В.В., Жданов В.И. Способ термической утилизации мусорных свалок и токсичных веществ // Управление техносферой: электрон. журнал, 2024. Т. 7. Вып. 2. URL: <https://technosphere-ing.ru> С. 248–266. DOI: 10.34828/UdSU.2024.27.59.007

Введение

Как следует из обращения Президента РФ В.В. Путина Федеральному собранию, в настоящее время в России практически с нуля создается современная отрасль обращения с отходами, в том числе и твердыми коммунальными отходами ТКО. В частности, для обработки и утилизации отходов построены 250 предприятий, ликвидировано 128 крупных свалок, и продолжается работа по ликвидации объектов накопленного экологического вреда и точек высокого экологического риска [1].

Мусорные свалки в малонаселенных пунктах (в деревнях и сёлах) представляют собой реальную угрозу экосистеме и здоровью их населения [2]. В табл. 1, как пример, приведен прогнозный объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО) на территории Республики Саха (Якутия) [3].

Таблица 1

Прогнозный объем образования ТКО на территории Республики Саха (Якутия) до 2030 года [3].

Показатель	2024 г.	2025 г.	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.
Масса образованных ТКО, тонн/г	322135	326648	331193	335769	340378	345018	349689

ТКО наносят серьезный вред окружающей среде, места их захоронения являются источником химических, биологических и других вредных веществ. Мусоросжигательные заводы рентабельны только в больших городах. При сжигании ТКО в атмосферу поступают различные вредные вещества. Отсюда вопрос эффективной термической утилизации ТКО чрезвычайно актуален для удаленных от крупных городов малонаселенных пунктах России, а также необходимо решить проблему снижения загрязнения атмосферы при термической утилизации ТКО.

Цель работы – разработка малогабаритной мусоросжигательной печи с камерой дожигания, предназначенной для термической утилизации твердых бытовых отходов, образующихся в малонаселенных пунктах России, а также для нейтрализации токсичных веществ.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- обзор способов утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО);
- изучен процесс двухзонного, двухстадийного горения ТКО в печи;
- разработана технологическая схема утилизации ТКО в малонаселенных пунктах России;
- предложен способ термической нейтрализации токсичных веществ, для чего они предварительно подвергаются растворению в воде.

Краткий обзор научно-технической информации

В настоящее время установлено, что для обеспечения экологической безопасности процесса термической утилизации ТКО необходимо поддержание стабильного теплового режима и высоких температур (1000 – 1200 °С) в зоне горения независимо от морфологического и элементного составов ТКО, а также организация пребывания продуктов сгорания твердого топлива в зоне с высокой температурой в течение не менее 4-5 сек [4].

В институте проблем химической физики РАН (Черноголовка, Московская обл.) разработан метод переработки твердых горючих отходов путем осуществления пиролиза и газификации органической составляющей твердых топлив [5]. ТКО после сортировки загружают в барабанную печь, установленную под наклоном, где твердые отходы подвергаются пиролизу с целью получения синтез-газа (рис. 1). Процесс горения твердых отходов в плотном слое стабилизируют, производя вращение реактора вокруг оси, наклонной по отношению к горизонту под углом в пределах от 22 до 65 градусов.



Рис. 1. Барабанная печь [5]

В Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете, МФТИ) создан комплекс ТУС-500 для термической утилизации ТКО после их сортировки, благодаря которому достигают полную безотходную утилизацию [6]. Конечным продуктом является синтез-газ, который используется для производства электрической энергии.

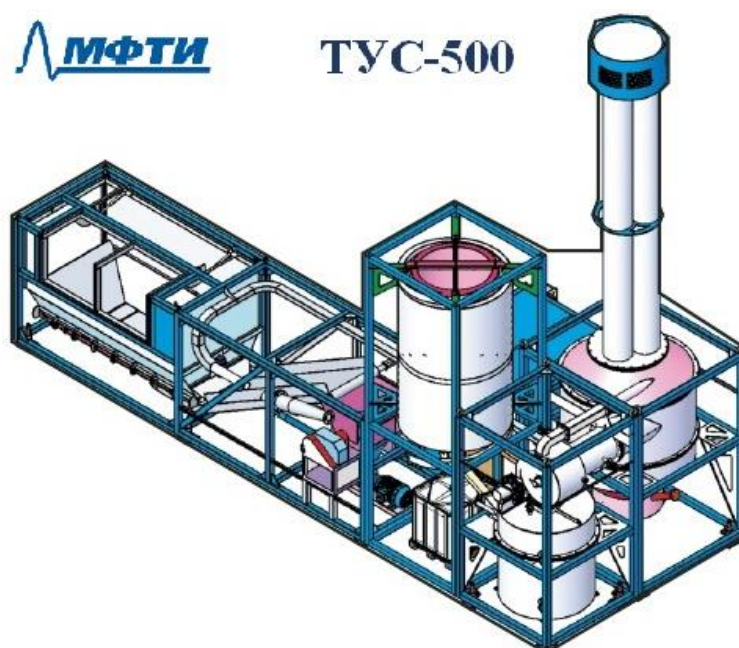


Рис. 2. Комплекс ТУС-500 [6]

Комплекс состоит из 4-х модулей, которых можно транспортировать на автомобильных платформах.

1. Модуль измельчения отходов.
2. Модуль сушки.
3. Модуль газификации.
4. Модуль дожига газа – котёл.

Габариты комплекса составляют: 10500:4600:4600 мм

Общая масса комплекса – 15,6 тонн.

Энергопотребление – 98,5 кВт.

Производительность – 500 кг/час.

Недостаток комплекса: большой расход электроэнергии.

Объекты и методы исследования

Термическая утилизация ТКО. На рис. 3 представлена технологическая схема термической утилизации ТКО [7], состоящая из печи, снабженной камерой дожига, компрессора с баллоном для хранения сжатого воздуха, направляемого для наддува бака с дизтопливом и приготовления мелкодисперсной двухфазной горючей смеси в форсунке, вентилятора для подачи воздуха в зону горения.

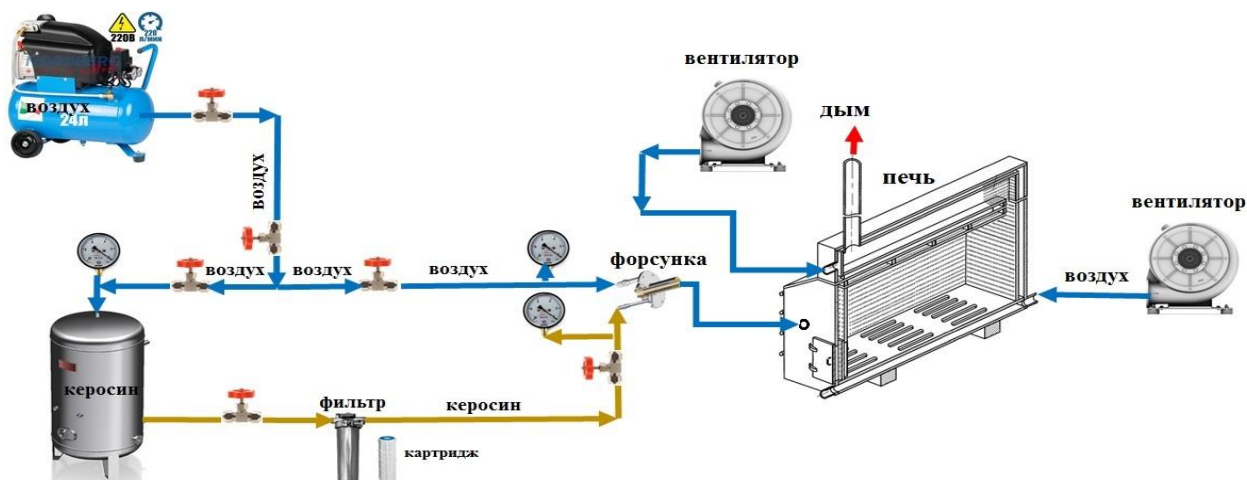


Рис. 3. Технологическая схема мусоросжигательной установки [6]

Печь с двухзонным горением. Печь (рис. 4) для термической утилизации ТКО [7] состоит из топочной камеры для сжигания твердого топлива и камеры дожигания дымового газа, благодаря чему в печи осуществляется двухзонное, двухстадийное горение ТКО.

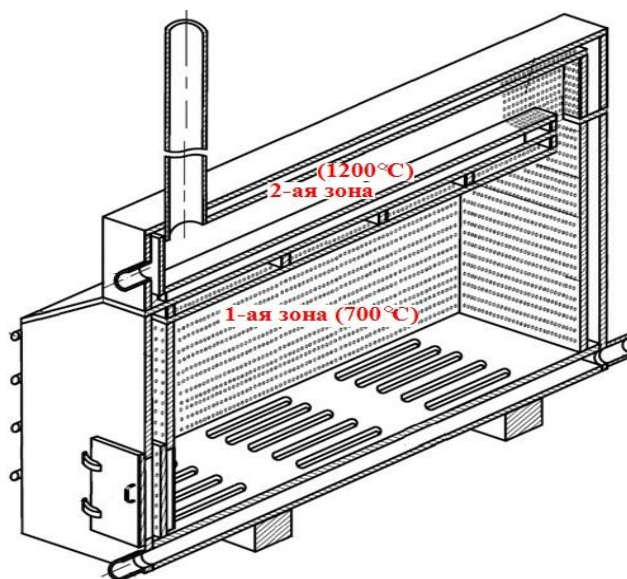


Рис. 4. Печь с камерой дожигания (с двухзонным горением) [7]

Для удобства изготовления и монтажа печь выполнена четырехугольной. В топочной камере при температуре $600\div 700$ °С происходит сжигание ТКО (1-ая зона горения), а в камере дожигания обеспечивается досжигание недосгоревших остатков твердого топлива (сажи и др.), содержащихся в дымовом газе, за счёт повышения температуры до 1200 °С, которое достигается путём подвода в камеру дожигания дополнительного воздуха (2-ая зона) [7].

Эмульсионная форсунка. Центробежная форсунка (рис. 5) [8], предназначенная для распыления жидкости, имеет цилиндрическую камеру, в которой происходит закручивание потока жидкости.

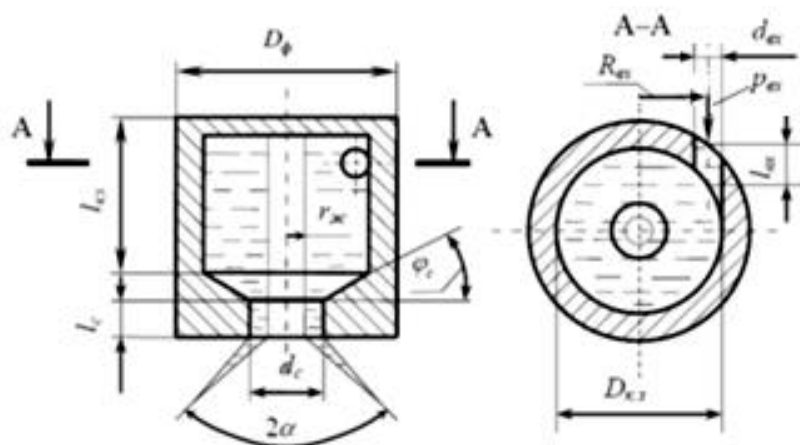
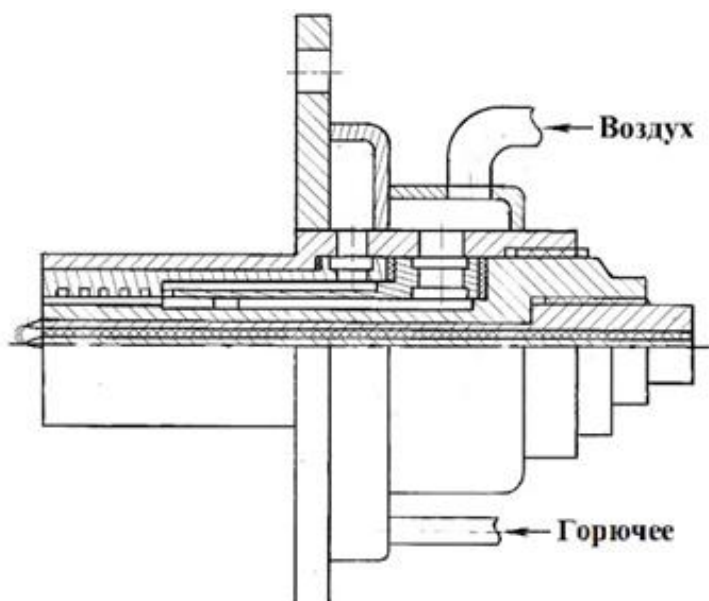


Рис. 5. Схема центробежной форсунки [8]

Жидкость попадает в цилиндрическую камеру по каналам, образованным тангенциально в её стенке, в результате чего внутри цилиндрической камеры закручивания получает вращательное движение, в результате чего возникает центробежная сила. Далее жидкость за счет возникшей центробежной силы прибивается к стенке камеры, вследствие чего по ее центру образуется газовый вихрь. Затем поток жидкости, получивший вдоль стенки камеры закручивания вращательное движение, истекает через сопло форсунки под заданным углом факела в виде пелены жидкости и распадается за счёт центробежной силы на мелкие капли.

Эмульсионная форсунка (рис. 6) представляет собой газожидкостную форсунку, состоящую из двух соосно установленных друг в друга цилиндров. У обоих цилиндров имеются на концах цилиндрические буртики, на которых расположены прямоугольные канавки, выполненные в виде шнека (рис. 7) [9-12].

**Рис. 6. Схема эмульсионной форсунки [9-12]****Рис. 7. Шнек [9-12]**

При этом у внешнего цилиндра канавки имеют поперечную форму с внутренней её стороны, а у внутреннего цилиндра – с наружной его стороны образованы либо по всему его периметру продольные прямоугольные канавки, либо в виде шнека (рис. 7) с винтовым направлением закрутки прямоугольных канавок, вследствие чего при их сочленении они образуют эмульсионную форсунку с пересекающимися канавками. Форсунка снабжена электросвечой, установленной по её оси (рис. 6).

Эмульсионная форсунка работает следующим образом. Сжатый воздух и жидкое топливо (например, дизтопливо) подаются отдельно в эмульсионную форсунку (рис. 6) и смешиваются внутри неё. За счет турбулизации потока (возникновения вихрей) в пересекающихся канавках, расположенных друг против друга, жидкое топливо дробится на мельчайшие капли, в результате чего двухфазная смесь из форсунки выходит в виде мелкого аэрозоля и воспламеняется от искры свечи. Путем изменения угла наклона шнека (рис. 7) в пересекающихся канавках эмульсионной форсунки можно регулировать дальность факела пламени.

На рис. 8 представлен внешний буртик эмульсионной форсунки [9], который был выполнен в виде шнека под углом $\beta = 60^\circ$, имеющий в сечении квадратную форму в количестве 12 штук и размером 1,5 мм×1,5 мм.

Эксперимент показал (рис. 9) [9], что факел распыла обладает высокой мелкостью и дисперсностью, равномерностью и достаточной дальностью.



Рис.8. Буртик форсунки со шнеком [9]

Рис. 9. Факел распыла [9]

Способ термической нейтрализации токсичных веществ

В работе «Установка для термической утилизации водного раствора токсичных веществ» [10] предлагается малогабаритную мусоросжигательную печь (рис. 4) с двухзонным горением использовать для термической нейтрализации токсичных веществ (например, формальдегида), растворив их предварительно в воде.

Для этого в технологическую схему термической утилизации ТКО добавляется еще бак с водным раствором токсичного вещества и трехкомпонентная форсунка. Для подачи в топочную камеру печи водного раствора токсичного вещества эмульсионная форсунка заменяется трехкомпонентной (рис. 10) [10].

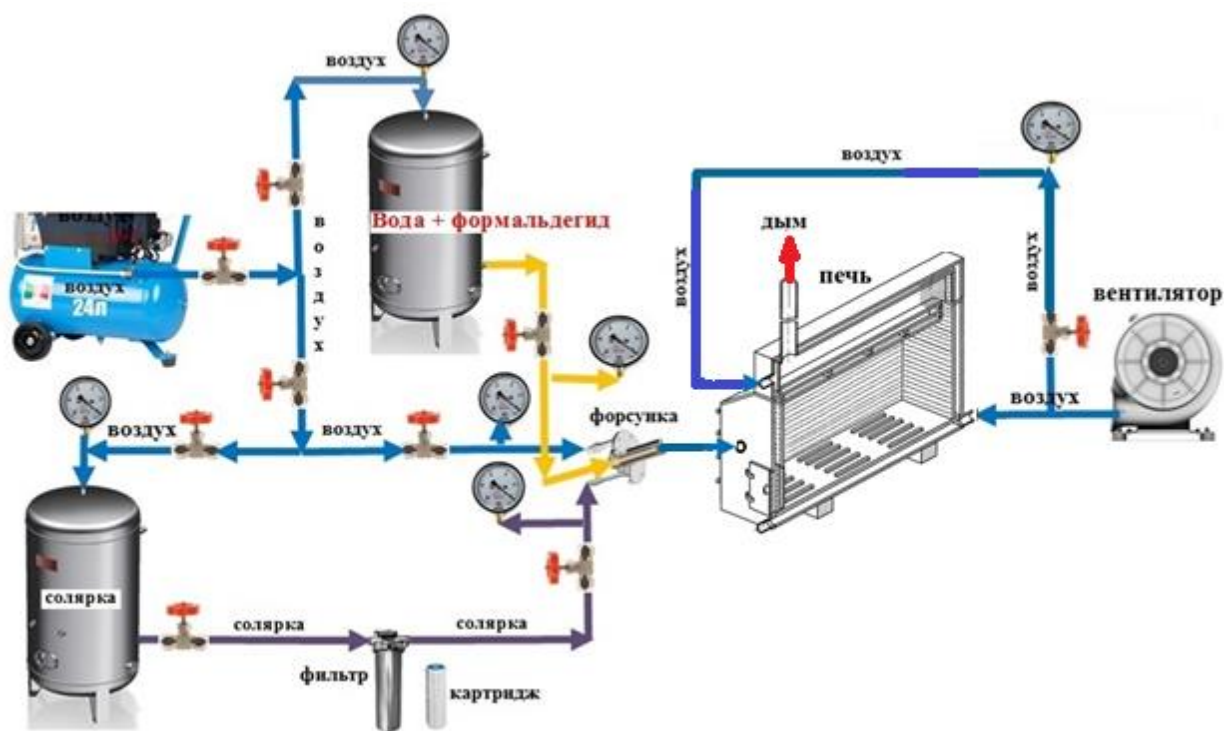


Рис. 10. Технологическая схема нейтрализации токсичного вещества

Нейтрализация токсичного вещества осуществляется следующим образом. Водный раствор токсичного вещества подается в топочную камеру в зону горения топлива, в результате чего он за счет интенсивного теплообмена испаряется при температуре $600\div 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в камере дожигания – за счет подвода дополнительного нагретого воздуха происходит досжигание недосгоревших остатков топлива, вследствие чего температура достигает до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, благодаря чему происходит полная нейтрализация токсичных веществ.

Данная печь подходит для нейтрализации любых ядовитых веществ, находящихся в газовом или жидком состоянии. Например, с её помощью можно нейтрализовать формальдегид, метанол, синильную кислоту, окислы азота, фосген, фтор, хлор, этиленамин и другие токсичные вещества.

Трехкомпонентная форсунка (рис. 11, 12) [11, 12] по периферии содержит эмульсионную форсунку для подачи горючей смеси, а по центру – шнековую форсунку для распыления водного раствора токсичного вещества.

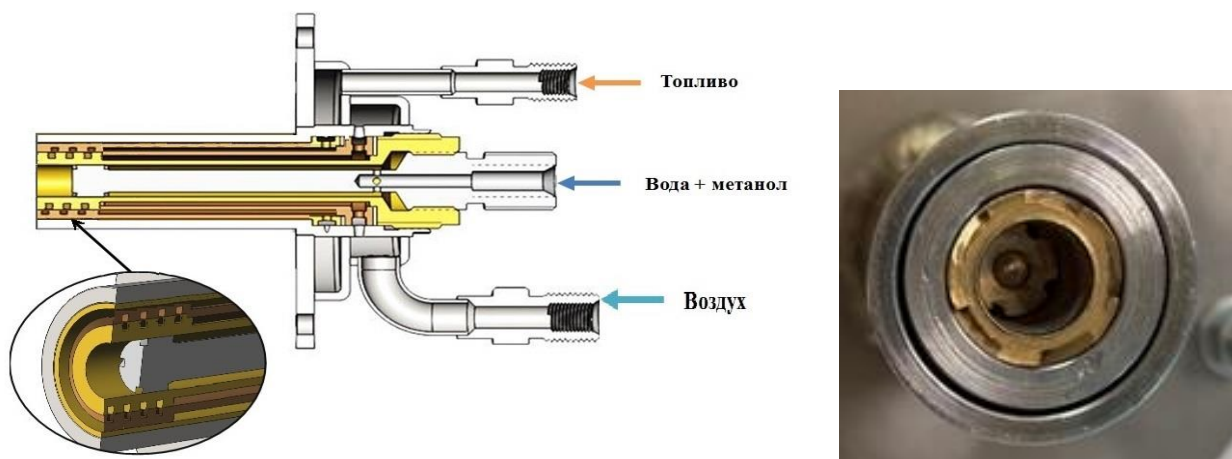


Рис.11. Схема трехкомпонентной форсунки [11,12] Рис.12 Торец форсунки [11, 12]

Трехкомпонентная форсунка работает следующим образом. С помощью эмульсионной форсунки, установленной на её периферии (рис. 11), в топочную камеру печи подается двухфазная горючая смесь в виде аэрозоля, где от постороннего источника энергии воспламеняется. Затем с помощью шнековой форсунки с открытой камерой закручивания (рис. 11, 12) в топочную камеру подается водный раствор токсичного вещества. При этом водный раствор токсичного вещества (например, формальдегида), проходя через ряд отверстий, попадает в буртик, выполненный в виде шнека, где струя получает вращательное движение, в результате чего поток жидкости в камеру закручивания поступает тангенциально. Внутри камеры закручивания струя водного раствора токсичного вещества (формальдегида) за счет возникшей центробежной силы прибивается к стенке камеры, в результате чего по ее центру образуется газовый вихрь. Затем поток жидкости, получивший вдоль стенки камеры закручивания вращательное движение, истекает из нее в виде пелены жидкости и распадается на мелкие капли внутри ядра факела пламени. Внутри факела пламени капли жидкости испаряются и вместе с дымовыми газами поступают в камеру дожигания, где они окончательно нейтрализуются за счет высокой температуры, достигающей до 1200 °С при досжигании несгоревшего топлива.

На рис. 13 представлена, как пример, работа трехкомпонентной форсунки – совместная работа эмульсионной и шнековой форсунок [11, 12].



Рис. 13. Факел распыления жидкостей [11, 12]

Огневые испытания мусоросжигательной печи

В г. Якутске, Республике Саха (Якутия) были проведены испытания мобильной мусоросжигательной печи без камеры дожигания, изготовленной местной фирмой «Эко-Энергия» (рис. 14) [13].



Рис. 14. Мусоросжигательная печь [13]

Результаты испытаний мусоросжигательной печи показали, что в отличие от своих российских аналогов, для её работы не нужен ни газ, ни любое другое топливо, так как для своей устойчивой работы она аккумулирует тепло, выделяемое при сжигании мусора в топочной камере. По результатам испытания печи установлена также фактическая производительность, которая составила 2,35 куб м ТКО в час.

По результатам Госэкспертизы в данной мусоросжигательной печи разрешено сжигать, перерабатывать, утилизировать, обрабатывать отходы III–V класса опасности. К ним относятся все бытовые, медицинские отходы, а также лесоперерабатывающей промышленности, животноводства и прочие отходы жизнедеятельности человека.

Заключение

1. Разработана с целью термической утилизации ТБО, образующихся в малонаселенных пунктах России, мобильная мусоросжигательная печь, снабженная камерой дожигания остатков в дымовом газе недосгоревшего твердого топлива, эмульсионной форсункой, вентилятором, компрессором и баком для топлива.

2. Разработана эмульсионная форсунка с пересекающимися канавками, обеспечивающая мелкость распыления жидкости 100 мкм при перепаде давления $1 \div 1,5$ атм путем образования в канавках газожидкостных вихрей.

3. Реализовано в печи двухзонное, двухстадийное горение за счет установки камеры дожигания дымового газа, куда подается дополнительный воздух, благодаря чему температура горения во 2-й зоне достигает 1200°C , в результате чего за счет повышения полноты сгорания твердого топлива достигается существенное снижение концентрации в дымовых газах вредных веществ.

4. Разработана трехкомпонентная форсунка, которая включает в себя две форсунки в одной конструкции – по её периферии подается воздух и жидкое топливо (эмульсионная форсунка), а по её оси – водный раствор токсичного вещества (шнековая форсунка).

5. Разработан способ термической нейтрализации токсичных веществ, суть которого заключается в помещении паров токсичного вещества в зону высоких температур (1200°C) в камере дожигания печи с двухзонным горением, а пары образуются путем испарения водного раствора токсичного вещества в топочной камере, при этом токсичное вещество перед распылением в печи предварительно растворяется в воде, в результате чего токсичные вещества, содержащиеся в дымовом газе, превращаются в безвредные за счёт полного их окисления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 29.02.2024 «Послание Президента Федеральному Собранию». Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_471111/
2. Способ утилизации мусорных свалок в малонаселённых пунктах России / В.В. Семёнов [и др.] // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 3. С. 4 – 9.
3. Распоряжение Правительства Республики Саха (Якутия) от 6 июня 2022 года N 493-р «Об утверждении региональной программы Республики Саха (Якутия). «Развитие

- комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) в Республике Саха (Якутия) на 2022-2030 годы»».
4. Ившин В.П., Полушин Р.В. Диоксины и диоксиноподобные соединения: пути образования, свойства, способы деструкции: монография. 2-е издание, перераб. и допол. Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2005. 319 с.
 5. Способ переработки конденсированного горючего путем газификации и устройство для его осуществления: пат. 2322641 Рос. Федерация. № 2006114599/03 / Дорофеенко С.О., Зайченко А.Ю. и др.; заявл. 27.11.2007; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11. 10 с.
 6. Овакимьян Г., Автамонов С. Ноль на полигон. Инжиниринговый центр по ТКО, МФТИ. 2022.
 7. Установка для сжигания твердого топлива: пат. 2773998 Рос. Федерация. № 2021135394 / Семенов В.В.; заявл. 02.12.2021; опубл. 14.06.2022. Бюл. № 17. 11 с.
 8. Курпатенков В.Д., Кесаев Х.В. Расчет форсунок двигателя: учебное пособие. М.: МАИ, 1987. 52 с.
 9. Термическая утилизация отработанных масел // В.В. Семенов [и др.]. Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 85 – 90.
 10. Установка для термической утилизации водного раствора токсичных веществ: пат. 2795339 Рос. Федерация. № 2022121069 / Семёнов В.В., Жданов В.И.; заявл. 02.08.2022; опубл. 02.05.2023. Бюл. № 3. 12 с.
 11. Установка для термической утилизации водного раствора токсичных веществ // Семенов В.В. [и др.] // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27 № 9, С. 11 – 15.
 12. Установка для термической утилизации водного раствора токсичных веществ: пат. 2789002 Рос. Федерация. № 2022115746 / Семёнов В.В., Жданов В.И.; заявл. 10.06.2022; опубл. 26.01.2023. Бюл. № 3. 12 с.
 13. Сивцева Надежда. Сжечь! (Пробные испытания мусоросжигательной установки). Газета «Якутск вечерний», 19.02.2024 г.

Поступила в редакцию: 14.05.2024

Сведения об авторах

Графкина Марина Владимировна

Профессор, д.т.н., профессор кафедры «Экологическая безопасность технических систем»
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение «Московский
политехнический университет», 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва,
Россия.

E-mail: marina.grafkina@rambler.ru

Семенов Василий Васильевич

д.т.н., профессор, специалист по техносферной безопасности. «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский университет)», МАИ. г. Москва, Россия.

E-mail: vasily_semenov@mail.ru

Жданов Владимир Игоревич

к.т.н., доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», МАИ.
г. Москва, Россия.

E-mail: vlig-47@yandex.ru

M.V. Grafkina, V.V. Semenov, V.I. Zhdanov

METHOD OF THERMAL UTILIZATION OF GARBAGE DUMPS AND TOXIC SUBSTANCES

Annotation. In Russia, 128 large dumps in cities have been liquidated for the last five years and further work on liquidation of objects of accumulated ecological harm and points of high ecological risk continues. The choice of solid municipal waste (SMW) utilization method depends on many factors, including morphological composition and physical properties of waste. Currently, there are several ways of utilization of SMW, among which is thermal utilization. Analysis of published scientific and scientific-technical sources has shown the presence of various methods of thermal utilization of wastes of different aggregate state, among them we can mention installations for "waste-free" utilization of SMW for small settlements. The disadvantages of existing methods of thermal utilization of SMW are also revealed, it is established that for thermal utilization of dioxins and furans it is necessary that combustion products should be in the combustion zone with a temperature of 1000 °C for at least 4-5 seconds. To improve the thermal utilization of SMW, the following were developed and protected by patents: a mobile furnace with a baffle to create two-zone combustion, a mobile two-zone furnace, a furnace with two-zone two-stage combustion. Calculations are given, the results of testing a pilot plant are presented. The possibility of using this method of thermal utilization of SMW and aqueous solutions of toxic substances in sparsely populated areas for the liquidation of objects of accumulated environmental harm is shown.

Keywords: objects of accumulated environmental harm, thermal utilization of wastes, toxic substances, furnaces with two-zone combustion, gas-liquid nozzles, spraying torch.

For citation: Grafkina M.V., Semenov V.V., Zhdanov V.I. [Method of thermal utilization of garbage dumps and toxic substances] *Upravlenie tekhnosferoi*, 2024, vol. 7, issue 2. (In Russ.) Available at: <https://technosphere-ing.ru/> pp. 248–266. DOI: 10.34828/UdSU.2024.27.59.007

REFERENCES

1. *Poslanie Prezidenta RF Federal'nomu Sobraniyu ot 29.02.2024 «Poslanie Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu»*. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tant Plyus». Address of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly dated February 29, 2024 «Message of the President to the Federal Assembly». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_471111/ (In Russ.).
2. Semenov V.V., Zhdanov V.I., Veretennikov I.Yu. et al. Sposob utilizatsii musornykh svalok v malonaselennykh punktakh Rossii [A method for recycling landfills in sparsely populated areas of Russia]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 4 – 9. (In Russ.).
3. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Respubliki Sakha (Yakutiya) ot 6 iyunya 2022 goda N 493-r «Ob utverzhdenii regional'noi programmy Respubliki Sakha (Yakutiya) «Razvitie kompleksnoi*

- sistemy obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami (TKO) v Respublike Sakha (Yakutiya) na 2022-2030 gody»* [Order of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia) dated June 6, 2022 N 493-r «On approval of the regional program of the Republic of Sakha (Yakutia) «Development of an integrated system for the management of municipal solid waste (MSW) in the Republic of Sakha (Yakutia) for 2022-2030 years.»»]. (In Russ.).
4. Ivshin V.P., Polushin R.V. *Dioksiny i dioksinopodobnye soedineniya: puti obrazovaniya, svoystva, sposoby destruktzii: Monografiya* [Dioxins and dioxin-like compounds: pathways of formation, properties, methods of destruction: Monograph]. 2nd edition, revised and expanded. Yoshkar-Ola: Mariiskii gosudarstvennyi universitet, 2005. 319 p. (In Russ.).
 5. *Sposob pererabotki kondensirovannogo goryuchego putem gazifikatsii i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Sposob pererabotki kondensirovannogo goryuchego putem gazifikatsii i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya]: pat. 2322641 Ros. Federatsiya. № 2006114599/03 / Dorofeenko S.O., Zaichenko A.Yu. i dr.; zayavl. 27.11.2007; publ. 20.04.2008, Bull. No11. 10 p. (In Russ.).
 6. Ovakimyan G., Avtamonov S. *Nol' na poligon* [Zero to the landfill]. *Inzhiringovyi tsentr po TKO* [Engineering center for solid waste], MIPT, 2022. (In Russ.).
 7. *Ustanovka dlya szhiganiya tverdogo topliva* [Installation for burning solid fuel. RF patent for invention]: pat. 2773998 Ros. Federatsiya. N 2021135394 / Semenov V.V.; zayavl. 02.12.2021; publ. 14.06.2022. Bull. No 17, 11 p. (In Russ.).
 8. Kurpatenkov V.D., Kesaev H.V. *Raschet forsunok dvigatelya: Uchebnoe posobie* [Calculation of engine injectors: Tutorial]. Moscow: MAI, 1987, 52 p. (In Russ.).
 9. Semenov V.V., Zhdanov V.I., Sinyukov I.A. et al. Termicheskaya utilizatsiya otrabotannykh masel [Thermal recycling of waste oils]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2023, no. 4, pp. 85 – 90. (In Russ.).
 10. *Ustanovka dlya termicheskoi utilizatsii vodnogo rastvora toksichnykh veshchestv* [Installation for thermal disposal of an aqueous solution of toxic substances]: pat. 2795339 Ros. Federatsiya. N 2022121069 / Semenov V.V., Zhdanov V.I.; zayavl. 02.08.2022; publ. 02.05.2023. Bull. No 3, 12 p.
 11. Semenov V.V., Zhdanov V.I., Sinyukov I.A. and others. *Ustanovka dlya termicheskoi utilizatsii vodnogo rastvora toksichnykh veshchestv* [Installation for thermal disposal of an aqueous solution of toxic substances]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2023, vol. 27, no. 9, pp. 11 – 15. (In Russ.).

12. *Ustanovka dlya termicheskoi utilizatsii vodnogo rastvora toksichnykh veshchestv* [Device for thermal disposal of an aqueous solution of toxic substances]: pat. 2789002 Ros. Federatsiya. N 2022115746 / Semenov V.V., Zhdanov V.I.; zayavl. 10.06.2022; publ. 26.01.2023. Bull. No 3. 12 p.
13. Sivtseva Nadezhda. *Szhech'!* (*Probnye ispytaniya musorozhigatel'noi ustanovki*) [Burn it! (Trial tests of a waste incineration plant)]. *Gazeta «Yakutsk vechernii»* [Newspaper «Yakutsk Evening»], 19.02.2024. (In Russ.).

Received: 14.05.2024

About the Authors

Grafkina Marina Vladimirovna

Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor. Department "Environmental Safety of Technical Systems" Federal State Autonomous Educational Institution "Moscow Polytechnic University", 107023, Moscow, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, Russia.

E-mail: marina.grafkina@rambler.ru

Semenov Vasily Vasilievich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Technosphere Safety Specialist. "Moscow Aviation Institute (National Research University)", MAI). Moscow, Russia.

E-mail: vasily_semenov@mail.ru

Zhdanov Vladimir Igorevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Federal State Budgetary Educational Institution "Moscow Aviation Institute (National Research University)", MAI). Moscow, Russia.

E-mail: vlig-47@yandex.ru