

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ГРУНТА, ЗАГРЯЗНЕННОГО ХЛОРСОДЕРЖАЩИМИ ТОКСИЧНЫМИ АГРОХИМИКАТАМИ

*Ю. А. Елеев\**, *М. В. Корольков*, *Н. Ю. Симонова*, *В. В. Афанасьев*,  
*В. В. Суворцев*

Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии», Москва,  
\*e-mail: [dir@gosniiokht.ru](mailto:dir@gosniiokht.ru)

Поступила в редакцию 20.10.2017 г.

Рассмотрены основные известные способы реабилитации загрязненных территорий. Предложена технология обезвреживания грунта, загрязненного хлорсодержащими токсичными соединениями (гексахлорбензол, гексахлорциклогексан), включающая в себя стадию термического обезвреживания грунта в барабанной печи при температуре 700–800°C с последующим дожигом органических веществ в камере дожигания и выдержки при температуре 1200°C в течение 2–3 секунд и при избытке кислорода не менее 3%. Экспериментально подтверждена эффективность указанной технологии на примере обезвреживания загрязненного грунта, содержащего гексахлорбензол и гексахлорциклогексан в количестве 18,29 мг/кг и 4,26 мг/кг, соответственно. На основании сопоставительного анализа, а также проведенных расчетов осуществлен синтез технологической схемы промышленной установки, включая систему газоочистки.

*Ключевые слова:* пестициды, агрохимикаты, загрязненный грунт, термообезвреживание, стойкие органические загрязнители.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из значимых проблем обеспечения химической и биологической безопасности Российской Федерации остается наличие огромных запасов непригодных пестицидов. В результате проведенной первичной инвентаризации на начало 2003 года на территории Российской Федерации выявлено 24 тыс. тонн пестицидов с истекшим сроком годности [1].

Наиболее опасны с точки зрения воздействия на окружающую среду хлорсодержащие органические пестициды. Важнейшей отличительной чертой большинства хлорорганических соединений является стойкость к воздействию различных факторов окружающей среды (температура, солнечная радиация, влага и др.) и нарастание их концентрации в последующих звеньях биологической цепи. Хлорорганические пестициды, такие как гексахлорбензол, изомеры гексахлорциклогексана (альфа-, бета-, гамма-ГХЦГ), крупнотоннажно производились и широко применялись в России в XX-м веке. Гексахлорбензол (ГХБ) был разрешен к применению как компонент ряда препаратов до начала 1990-х годов, а ГХЦГ использовался в качестве инсектицида для уничтожения

вредителей и паразитов. В 2011 году Российская Федерация ратифицировала Стокгольмскую конвенцию (далее – Конвенция), в соответствии с которой ГХБ и ГХЦГ относятся к стойким органическим загрязнителям (СОЗ), и их использование запрещено, а запасы подлежат полной ликвидации [2].

В 2015 году в Российской Федерации была принята федеральная целевая программа «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2015-2020 годы)» (далее – Программа), целью которой является укрепление и развитие системы химической и биологической безопасности для последовательного снижения до приемлемого уровня риска воздействия опасных факторов на население и окружающую среду.

В соответствии с Программой был определен перечень объектов, представляющих потенциальную опасность для окружающей среды.

Одним из таких объектов является полигон захоронения пестицидов «Большие Избищи» в Липецкой области, куда в течение нескольких десятилетий без соблюдения необходимых санитарных и экологических норм свозились агрохимикаты из Курской, Липецкой и Воронежской областей.

В ходе комплексного обследования в 2015 году по всей площади полигона были отобраны пробы грунта с глубины до 4 м. Загрязнение грунта на территории полигона носило очаговый характер. Пробы, отобранные из очагов загрязнения с глубины ~3-4 м, обладали резким специфичным запахом.

Проведенное химико-аналитическое исследование отобранных проб грунта выявило существенное превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) гексахлорбензола (ГХБ). Причем в ряде проб превышение ПДК достигало нескольких десятков и даже сотен раз.

ГХБ является чрезвычайно устойчивым к воздействию биотических и абиотических факторов, а также практически не подвергается гидролизу в почве. Кроме того, у ГХБ достаточно высокая проникающая способность в почве [3].

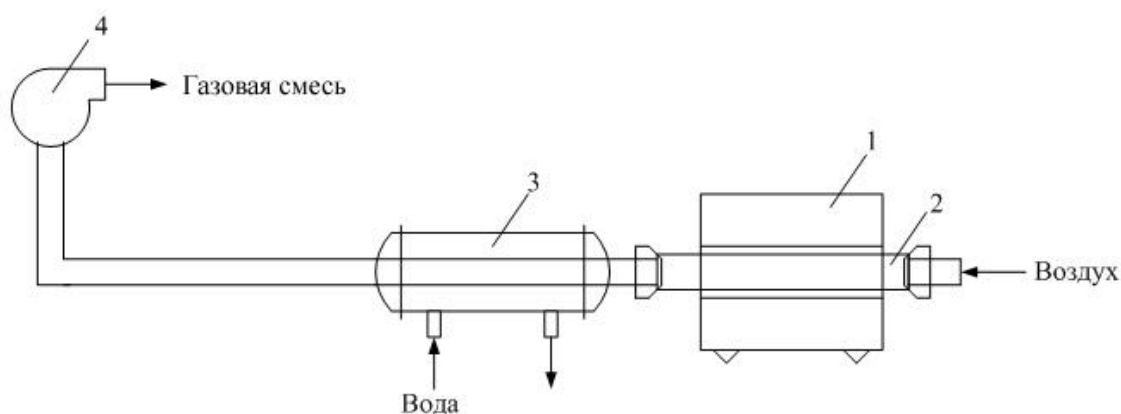
Кроме того, было отмечено превышение ПДК (до нескольких сотен раз) по гексахлорциклогексану (ГХЦГ). Хотя ГХЦГ по сравнению с ГХБ менее устойчив в почве, скорость его разложения весьма низкая и сильно зависит от внешних условий [3].

Общая площадь очагов, загрязненных ГХБ и ГХЦГ, составила ~2500 м<sup>2</sup>, а объем ~3100 м<sup>3</sup>.

Основной целью Конвенции является охрана здоровья человека и окружающей среды от воздействия СОЗ [4]. Таким образом, во исполнение международных обязательств Российской Федерацией по сокращению и ликвидации запасов СОЗ задача разработки технологии обезвреживания содержимого полигона «Большие Избищи» является актуальной.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Принципиальная схема лабораторной установки обезвреживания загрязненного грунта представлена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема лабораторной установки обезвреживания загрязненного грунта.

Исследуемый образец помещался в реактор поз. 2 (кварцевую трубку для нагрева) и равномерно распределялся в средней высокотемпературной части (с учетом расположения в муфеле). Реактор помещался в прогретую до рабочей температуры муфельную печь (поз. 1) проточного типа. Реактор (поз. 2) диаметром 40 мм, длиной 800 мм на выходе из муфельной печи имел прямой холодильник (поз. 3) для охлаждения отходящих газов, которые под действием дымососа (поз. 4) подавались с потоком проходящего воздуха в систему вытяжки. Время выдержки образца при заданной температуре – 1 час.

Скорость просасывания воздуха с помощью дымососа составила 3–4 мл/мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Выбор и экспериментальное обоснование технологии обезвреживания*

На основании архивных данных, данных о составе промышленно выпускавшихся смесей агрохимикатов, а также результатов анализа отобранных проб был определен состав загрязненного грунта (табл. 1).

**Таблица 1.** Состав загрязненного грунта

Наименование	%, масс.
Загрязненный грунт, в т.ч.:	100,00
Грунт	67,18
Хлорорганические соединения	5,01
Инертный наполнитель (тальк $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ; пирофиллит $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2$ ; каолин $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ )	10,78
$H_2O$	17,03

Критерии выбора способа обезвреживания следующие [5–9]:

- эффективность обезвреживания;
- степень уменьшения объемов загрязнения;
- степень снижения токсичности загрязнителей;
- материальные затраты.

Существующие способы обезвреживания грунта могут быть условно разделены на биологические и небиологические. Небиологические способы подразделяются на физико-химические, термические способы и иные (например, сверхкритическая экстракция и электрокинетика) [10, 11].

Наиболее распространенные промышленные способы обезвреживания грунта сведены в таблицу 2.

**Таблица 2.** Классификация способов обезвреживания грунта

Группа способов	Подгруппа способов	Наименование способа
Биологические	-	Жидкофазная биоремедиация
		Твердофазная биоремедиация
		Компостирование
Небиологические	Физико-химические	Реагентная обработка окислителями
		Дегалогенирование
		Стабилизация/солидификация
		Парожидкостная экстракция
		Экстракция растворителем
	Термические	Термическая десорбция
		Сжигание
		Пиролиз

Биоремедиация (биодеструкция) как правило применима для обезвреживания грунта с низким уровнем загрязнения, т.к. неизбежно токсическое воздействие на микроорганизмы и, как следствие, снижение эффективности процесса. Подбор микроорганизмов для обезвреживания многокомпонентных смесей ядохимикатов переменного состава является достаточно сложной и трудоемкой задачей. Кроме того, процессы биодеструкции достаточно длительны по времени [12, 13].

Целевой группой загрязнителей для процесса реагентной обработки загрязненного грунта окислителями (озон, гипохлориты, перекись водорода и т.п.) являются неорганические соединения [14].

Лимитирующим фактором применения дегалогенизации (например, промышленный процесс APEG-PLUS) является высокое содержание глины и влаги в загрязненном грунте, приводящее к повышенному потреблению реагентов. В промышленных процессах высокотемпературной дегалогенизации используется водород (процесс Eco Logic), что снижает общую пожаро- и взрывобезопасность процесса, и одновременно повышает стоимость его реализации. При этом необходимо отметить достаточно высокую эффективность дегалогенизации для обезвреживания CO<sub>2</sub> и пестицидов [15].

Парожидкостная экстракция и экстракция растворителем не уничтожают загрязнители, а лишь извлекают их из грунта [16, 17]. Эти способы можно рассматривать как предварительную стадию обезвреживания, но не полноценную комплексную технологию. Проблема обезвреживания агрохимикатов при этом не решается.

Солидификация, так же как и процесс реагентной обработки окислителями, в основном применима для обезвреживания неорганических соединений, а ее эффективность для органических загрязнителей носит переменный характер [18].

В промышленных процессах пиролиза практически невозможно добиться полного отсутствия кислорода, т.е. фактически пиролитические системы работают с меньшим его стехиометрическим количеством [19]. Таким образом, при пиролизе хлорорганических соединений в присутствии даже небольших количеств кислорода, а также оксидов металлов (например железа), существует вероятность образования вторичных диоксинов [20–22]. Создание полностью бескислородной атмосферы в промышленном аппарате очевидно может значительно увеличить стоимость процесса обезвреживания. Кроме того, пиролиз, как правило, ведут под давлением [23], что создает риск попадания неочищенных отработанных технологических газов в окружающую среду через неплотности оборудования.

Одним из основных аспектов, затрудняющих применение метода сжигания, является наличие в обезвреживаемых материалах тяжелых металлов, которые могут частично выноситься из печи в составе газовой смеси, а также присутствие хлора, который в условиях высоких температур может образовывать высокотоксичные легколетучие соединения и способствовать ресинтезу вторичных диоксинов [24–28]. Присутствие тяжелых металлов требует организации дополнительных мер по их локализации и нейтрализации, что может, в конечном итоге, заметно увеличить капитальные и эксплуатационные затраты.

Высокотемпературная десорбция фактически является физическим процессом разделения и не предназначена для разрушения органических загрязняющих веществ. Температура в основном агрегате и время пребывания загрязнителей в нем таковы, что загрязнители возгоняются, а разлагаются лишь частично [29, 30].

На основании проведенного анализа известных промышленных способов, наиболее подходящей технологией обезвреживания загрязненного грунта с территории полигона «Большие Избищи» представляется термическое обезвреживание по следующим причинам:

1. Имеется доказанная эффективность по уничтожению высокотоксичных органических соединений, таких как ГХБ [31, 32].

2. Технология универсальна и подходит для обезвреживания смесей органических загрязнителей (включая СОЗ) переменного состава [33].

3. Существует большой мировой опыт ее применения, в том числе в крупнотоннажном промышленном масштабе [34].

Для оценки эффективности выбранного способа обезвреживания нами были проведены экспериментальные исследования по обжигу образцов загрязненного грунта, отобранного с территории полигона.

Изначальное содержание ГХБ и ГХЦГ в пробах превышало ПДК более чем в 400 и 10 раз, соответственно (табл. 3).

**Таблица 3.** Результаты анализа проб грунта [35]

№ п/п	Наименование пробы	Определяемый компонент	ПДК, мг/кг	Результаты измерений, мг/кг	Класс опасности*
1	Загрязненный грунт	ГХБ	0,03	18,29	II
		ГХЦГ	0,1	4,26	
2	Обожженный грунт (700°С)	ГХБ	0,03	0,010	IV
		ГХЦГ	0,1	0,004	
3	Обожженный грунт (800°С)	ГХБ	0,03	0,010	IV
		ГХЦГ	0,1	< 0,001	

\*По результатам токсикологического анализа методами биотестирования на гидробионтах

Анализ проб показал, что после термообработки содержание загрязнителей в грунте было ниже ПДК и он может быть отнесен к IV классу опасности. При этом стоит отметить, что повышение температуры прокалики с 700 до 800°С не оказало никакого влияния на конечное содержание ГХБ (эффективность термообезвреживания 99,95%), тогда как эффективность термообезвреживания ГХЦГ повысилась с 99,91% до 99,97%.

С учетом сроков выполнения Программы производительность установки обезвреживания загрязненного грунта была определена как 300 кг/ч.

В качестве основного агрегата была выбрана прямоточная барабанная печь, как одна из наиболее доступных и широко применяемых для подобных процессов [34, 36].

По результатам исследований разработана технология термического обезвреживания загрязненного грунта, которая включает в себя два основных этапа:

1. Термическое обезвреживание загрязненного грунта в барабанной печи при температуре 700°С÷800°С.

2. Дожигание несгоревших органических веществ в камере дожигания и выдержки при температуре 1200°С в течение 2-3 секунд и при избытке кислорода не менее 3% [37].

### ***Синтез технологической схемы установки обезвреживания загрязненного грунта***

Как следует из таблицы 1, при обжиге загрязненного грунта в составе дымовых газов будет присутствовать мелкодисперсная пыль, которая относится к загрязнителям с локальным характером распространения и воздействия [38], а также кислые соединения, образовавшиеся в результате разложения хлорорганических соединений. В связи с этим очевидна необходимость установки системы газоочистки.

Основными аппаратами, промышленно применяемыми для очистки газов являются [39]:

- циклоны;
- скрубберы;
- рукавные фильтры;
- электрофильтры;

– адсорберы.

Следующие параметры являются базовыми при выборе оборудования для очистки газов [40, 41]:

- объемный расход газового потока;
- температура газового потока;
- влагосодержание газового потока;
- концентрация загрязнителей;
- размер твердых частиц.

Среди этих показателей один из самых главных – размер улавливаемых твердых частиц, на поверхности и в объеме которых зачастую сорбируются загрязнители [28].

На сегодняшний день газоочистка от пыли основывается на различных физических механизмах в зависимости от размера частиц: силы тяжести, центробежных сил, электрического импульса, а также броуновского движения [42]. Так, улавливание частиц менее 10 мкм за счет сил тяжести малоэффективно ввиду крайне незначительной скорости витания [43].

В циклонах могут быть уловлены частицы менее 5 мкм, однако для этого необходимо поддерживать крайне высокую скорость входящего газового потока, что ведет к повышению энергозатрат и делает применение данного типа аппаратов для улавливания мелких частиц нецелесообразным [43].

Что касается электрофильтров – они весьма эффективны для улавливания частиц менее 1 мкм [44]. При этом электрофильтры довольно требовательны к условиям их эксплуатации, а также имеют большие габариты (т.е. высокие начальные капитальные и эксплуатационные затраты) [45]. Кроме того, эффективность улавливания (для сухих электрофильтров) сильно зависит от удельного электрического сопротивления частиц, что также сужает диапазон их применимости [46].

Рукавные фильтры обычно применяются для улавливания частиц до 0,1 мкм, а их эффективность достигает более 99% [47]. Они достаточно просты в управлении и обслуживании, однако, как правило, имеют температурный предел применения около 200°C в зависимости от фильтрующего материала [42].

При правильно подобранном технологическом режиме эффективность скрубберов по улавливанию пыли и кислых газообразных соединений может достигать 99% [48, 49], но условия их работы таковы, что они склонны к коррозии и эрозии [50]. Данное обстоятельство ведет к увеличению материальных затрат как на изготовление, так и на текущий ремонт. Также, необходима организация постоянной подачи свежего абсорбента (обычно воды), что не всегда возможно.

Адсорберы, заполненные адсорбентом с большой удельной поверхностью (например активированным углем), являются одними из наиболее эффективных аппаратов для улавливания даже незначительных количеств загрязнителей в газовой фазе [51]. Ощутимым неудобством их применения является то, что по мере накопления загрязнителей в объеме адсорбента может потребоваться либо

дорогостоящая и энергозатратная процедура регенерации, либо его утилизация как отхода [52].

Важно отметить, что при сжигании хлорорганических соединений необходимо предусмотреть стадию резкого охлаждения дымовых газов после печи (закалка) до температуры ниже  $200^{\circ}\text{C}$  во избежание образования вторичных диоксинов [53]. Как правило, для этих целей в промышленности применяется полый распылительный скруббер, а в качестве охлаждающего распыляемого агента используется водный раствор щелочного реагента с концентрацией не более 10% масс. [54, 55].

Размер распыляемых капель обычно находится в диапазоне 10-200 мкм [56]. Если условно принять, что капля имеет форму сферы, а концентрация щелочного реагента 10% масс., то по известным уравнениям зависимости объема от диаметра и массы от плотности можно определить ориентировочный размер твердых частиц щелочи, выделяющихся при испарении воды в охлаждающем скруббере. Таким образом, размер частиц щелочи, уносимых газовым потоком из охлаждающего скруббера, будет  $\sim 1-20$  мкм.

На основании анализа известных способов газоочистки был синтезирован промышленный узел, состоящий из последовательно соединенных распылительного (закалочного) скруббера-рукавного фильтра-насадочного скруббера:

1. Применение распылительного (закалочного) скруббера позволяет резко охладить горячие дымовые газы, выходящие из печи термообезвреживания, до температуры менее  $200^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, при распылении водно-щелочного раствора в объем скруббера происходит частичная нейтрализация кислых газообразных соединений, что, в свою очередь, снижает коррозионную нагрузку на последующие ступени газоочистки.

2. Наиболее универсальным решением для улавливания частиц пыли размером до 0,1 мкм независимо от их удельного электрического сопротивления представляется использование рукавного фильтра. Несмотря на то, что на рукавных фильтрах в процессе эксплуатации поддерживается достаточно высокий перепад давления (что повышает энергетическую нагрузку на систему в целом), этот недостаток компенсируется относительной компактностью и простотой конструкции.

3. Остаточные количества газообразных кислых соединений могут быть эффективно нейтрализованы в мокром насадочном скруббере, орошаемом водным раствором щелочи, за счет развитой поверхности контакта и интенсивного массообмена между газовой и жидкой фазами. Кроме того, использование рукавного фильтра предотвращает преждевременное засорение насадочного скруббера пылью.

В качестве дополнительной меры по улавливанию возможных следовых количеств диоксинов предусмотрено распыление измельченного активированного угля в газовый поток перед рукавным фильтром [57].



Особенностью систем мокрой очистки является образование сточных вод, которые нуждаются в дальнейшей переработке [58]. Данное обстоятельство очевидным образом усложняет и удорожает процесс газоочистки.

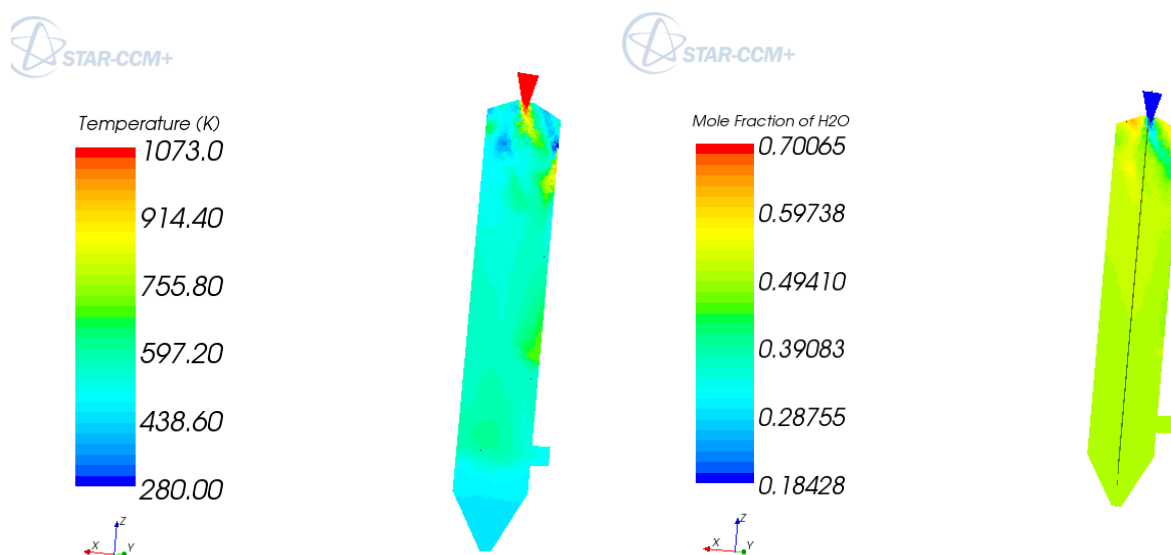
Проблема была решена организацией замкнутого водяного контура «насадочный скруббер-закалочный скруббер». Так, в закалочный скруббер, который работает в режиме распылительной сушилки, подается водно-солевой раствор. Твердые частицы и водяные пары вместе с дымовыми газами при температуре 200°C выходят из закалочного скруббера и проходят рукавный фильтр, где осаждаются твердая фракция (пыль и выкристаллизовавшиеся соли), и далее, попадая в насадочный скруббер, охлаждаются до температуры 70–80°C. За счет разницы между значениями влагонасыщения газовоздушной смеси в насадочном скруббере образуется конденсат, который повторно направляется в закалочный скруббер.

Реализуемость указанного режима работы закалочного скруббера была подтверждена расчетами, проведенными ОАО НПП «Химмашстарт» (г. Пенза). Основные характеристики материальных потоков, а также результаты расчетов представлены в таблице 4 и на рисунке 2, соответственно.

**Таблица 4.** Основные характеристики материальных потоков\*

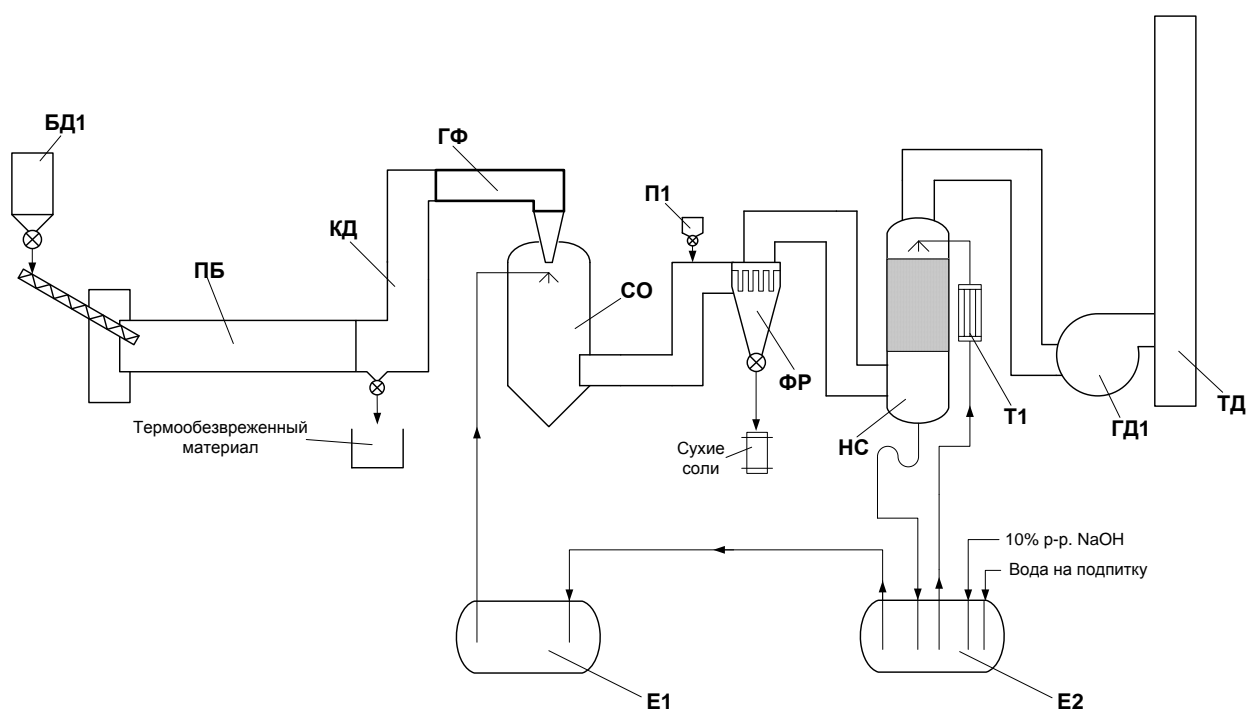
Наименование	Производительность скруббера-охладителя, кг/час	
	Вход	Выход
	Массовый расход, кг/час	
Дымовые газы, в т.ч.:	2634	4905
H <sub>2</sub> O	360	1400
Водно-солевой раствор	1044	–

\*Принятый средний размер распыляемых капель 100 мкм



**Рис. 2.** Градиенты температуры и влаги в объеме скруббера-охладителя.

Принципиальная схема промышленной установки термообезвреживания загрязненного грунта представлена на рисунке 3.



**Рис. 3.** Принципиальная схема установки термического обезвреживания загрязненного грунта: БД1 – бункер-дозатор загрязненного грунта; ПБ – печь барабанная; КД – камера дожигания; ГФ – газоход футерованный; СО – скруббер-охладитель (закалочный); П1 – дозатор активированного угля; ФР – фильтр рукавный; НС – насадочный скруббер; Т1 – теплообменник; ГД1 – газодувка; ТД – дымовая труба; Е1,2 – расходные емкости.

По результатам представления в государственную экологическую экспертизу проекта на новую технологию получено положительное заключение.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сопоставительный анализ существующих технологий обеззараживания грунта показал, что наиболее оптимальным способом с точки зрения эффективности обеззараживания, а также применимости в промышленном масштабе является термическое обезвреживание загрязненного СОЗ грунта в барабанной печи.

Экспериментально показано, что при прокалке (700–800°С в течение 1 часа) загрязненного СОЗ грунта остаточное содержание загрязнителей (ГХБ, ГХЦГ) не превышает предельно допустимых концентраций.

С учетом действующих нормативов по воздействию на окружающую среду, осуществлен синтез технологической схемы установки термического обезвреживания, включая узел газоочистки, состоящий из последовательно соединенных камеры дожигания и выдержки, распылительного (закалочного) скруббера, рукавного фильтра и насадочного скруббера. В качестве дополнительной меры по улавливанию возможных следовых количеств диоксинов предусмотрено распыление измельченного активированного угля в газовый поток перед рукавным фильтром.

Расчетным способом показано, что при организации замкнутого водяного контура «насадочный скруббер-распылительный (закалочный) скруббер» возможно осуществлять эффективную мокрую очистку дымовых газов без образования сточных вод.

Список литературы:

1. *Треггер Ю.А., Чагур К.А.* // Энциклопедия инженера-химика. 2010. № 10. С. 21.
2. *Треггер Ю.А.* // Тонкие химические технологии. 2011. Т. 5(6), С. 87.
3. *Wang R.* // *Advanced Materials Research*. 2012. V. 356–360. P. 620.
4. REGULATION (EC) No 850/2004 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 April 2004 on persistent organic pollutants and amending Directive 79/117/EEC. P. 9.
5. *Cheremisinoff N.P.* *Groundwater Remediation and Treatment Technologies*. Westwood, New Jersey: Noyes Publications, 1997. P. 309.
6. *Gavrilescu M.* // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2006. V. 5. P. 79.
7. *Lodolo A., Gonzalez-Valencia E., Miertus S.* // *Arh. Hig. Rada. Toksikol*. 2001. V. 52. P. 253.
8. *Rao P.S.C., Jawitz J.W., Enfield C.G., Falta R.W., Annable M.D., Wood A.L.* // *Groundwater Quality 2001 Conference*. Sheffield, UK, 2001. No. 275. P. 571.
9. *Vik E.A., Bardos P., Brogan J., Edwards D., Gondi F., Henrysson T., Jensen B.K., Jorge C., Mariotti C., Nathanail P., Papassiopi P.* // *Land Contamination & Reclamation*. 2001. V. 9. P. 119.
10. *Sellers K.* *Fundamentals of Hazardous Waste Site Remediation*. Boca Raton: Lewis Publishers/CRC Press, 1998. P. 210.
11. *Bhandari A., Surampalli R.Y., Champagne P., Ong S.K., Tyagi R.D., Irene M. C. Lo.* *Remediation Technologies for Soils and Groundwater*. American Society of Civil Engineers, 2007. P. 4.
12. *Committee on In Situ Bioremediation, National Research Council.* *In Situ Bioremediation: When Does it Work?* Washington, DC: National Academic Press, 1993. P. 25.
13. *Mohee R., Mudhoo A.* *Bioremediation and Sustainability: Research and Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. P. 8.
14. *Wang L.K., Hung Y-T., Shammas N.K.* *Advanced Physicochemical Treatment Processes*. Totowa: Humana Press Inc., 2006. P. 501.
15. *Poillon F.* *Dioxin Treatment Technologies*. DIANE Publishing, 1991. PP. 38, 42.
16. *Hyman M., Dupont R.R.* *Groundwater and Soil Remediation. Process Design and Cost Estimating of Proven Technologies*. Reston: ASCE Press, 2001. P. 333.
17. *Raghavan R., Dietz D.H., Coles E.* // EPA Report EPA 600/2-89/034. Environmental Lab, Technical Report EL-88-24. 1989.
18. *Spence R.D., Shi C.* *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes*. Boca Raton: CRC Press, 2004. P. 119.
19. *Soesilo J. A., Wilson S. R.* *Site Remediation: Planning and Management*. New York: CRC Press, 1997. P. 340.
20. *Zheng M.H., Bao Z.C., Wang K.O., Xu X.B.* // *Bull. Environ. Contam. Toxicol*. 1997. V. 59. P. 83.
21. *Altarawneh M., Carrizo D., Ziolkowski A., Kennedy E., Dlugogorski B., Mackie J.* // *Chemosphere*. 2009. No. 74(11). P. 1435
22. *Кунцевич А.Д., Головков В.Ф., Рембовский В.Р.* // *Успехи химии*. 1996. Т. 65 (1). С. 29.
23. *Bo L.* *Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh*. 2008.
24. *Wielgosinski G., Namiecinska O., Lechtanska P., Grochowalski A.* // *Ecol. Chem. Eng. S*. 2016. V. 23(2). P. 249.
25. *Altarawneh M., Dlugogorski Z., Kennedy E., Mackie J.* // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009. V. 35. P. 245.

26. *Tuppurainen K., Halonen I., Ruokojarvi P., Tarhanen J.* // *Chemosphere*. 1998. V. 36 (7). P. 1493.
27. *Tuppurainen K.A., Ruokojarvi P.H., Asikainen A.H., Aatamila M., Ruuskanen J.* // *Environmental Sci. Technol.* 2000. V. 34. P. 4958.
28. *Khallaf M.K. (ed).* *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*. Rijeka: InTech, 2011. PP. 6, 351.
29. *Anderson W.C.* *Innovative Site Remediation Technology – Thermal Desorption, Volume 6*. American Academy of Environmental Engineers, 1993. P. 22.
30. *Lehr J.H.* *Wiley's Remediation Technologies Handbook: Major Contaminant Chemicals and Chemical Groups*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. P. 1140.
31. *Ahling B., Lindskog A.* // *The Science of the Total Environment*. 1978. V. 10. P. 51.
32. *Watanabe M., Noma Y.* // *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* 2010. V. 45(7). P. 846.
33. *Gunther F.A.* *Residues of Pesticides and Other Contaminants in the Total Environment*. N.Y.: Springer Science & Business Media, 1979. P. 9.
34. National Research Council, 2000. *Waste Incineration and Public Health*. Washington, DC: National Academies Press, 2000. P. 23.
35. *Кудрявцева В.В., Елеев Ю.А., Кручинина Н.Е., Афанасьев В.В.* // *Успехи в химии и химической технологии*. 2016. Т. 30(9). С. 81.
36. *Bellandi R. (ed).* *Hazardous waste site remediation: the engineer's perspective*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988. P. 347.
37. ИТС 9-2015 «Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов)». М: Бюро НДТ, 2015. С. 87.
38. *Афанасьева А.А., Назаренко Д.И., Швецова-Шиловская Т.Н., Корольков М.В., Орлов А.Ю.* // *Безопасность жизнедеятельности*. 2016. № 4(184). С. 20.
39. *Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г.* *Очистка газов: Справочное издание*. М.: Теплоэнергетик, 2002. С. 4.
40. *Richard D.* // *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1974. V. 24(12). P. 1156.
41. *Danzomo B.A., Salami M-J.E., Khan Md.R.* // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012. V. 3(11). P. 1.
42. *Srinivasan D.* *Environmental Engineering*. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2009. P. 123.
43. *Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К.* *Очистка промышленных газов от пыли*. М.: Химия, 1981. С. 31, 77.
44. *Mizuno A.* // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000. V. 7(5). P. 615.
45. *Hung Y-T., Wang L.K., Shammam N.K.* *Handbook of Environment and Waste Management: Air and Water Pollution Control*. Singapore: World Scientific, 2012. P. 27.
46. *Baukal Jr. C.E.* *Industrial Combustion Pollution and Control*. N.Y.: CRC Press, 2003. P. 435.
47. *Hilber T.* *UPSWING: An Advanced Waste Treatment Concept Compared to State-of-the-art*. Goettingen: Cuvillier Verlag, 2008. P. 13.
48. *Danzomo B.A., Salami M-J.E., Khan Md.R., Iskandar M. Nor.* // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. V. 7(12). P. 1669.
49. *Bartocci A.C.* *High Efficiency SO<sub>2</sub> Scrubber Design to Reduce Caustic Consumption*. (Paper # 35), Envitech, Inc. [https://cdn2.hubspot.net/hub/62003/file-26219387-pdf/docs/it311\\_so2\\_scrubber\\_rev\\_3.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hub/62003/file-26219387-pdf/docs/it311_so2_scrubber_rev_3.pdf) (дата обращения 20.10.2017).
50. *Adams A.B.* // *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1976. V. 26(4). P. 303.
51. *Le Cloirec P., Pre P., Delage F., Giraudet S.* // *Environ. Technol.* 2012. V. 33(1-3). P. 285.
52. *Irfan K.S., Pascaline P., Babu J.A.* // *Chem. Sci. Trans.* 2013. V. 2(4). P. 1078.
53. *Longwell J.P.* *Alternative technologies for the destruction of chemical agents and munitions*. Washington, DC: National Academy Press, 1993. P. 85.
54. *Santolero J.J., Theodore L., Reynolds J.* *Introduction to Hazardous Waste Incineration*. N.Y.: John Wiley & Sons, 2000. P. 473.

55. *Schnelle K.B., Brown C.A.* Air Pollution Control Technology Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2016. P. 117.
56. *Karlsson H.T., Klingspor J.* // Chem. Eng. Technol. 1987. V. 10(2). P. 104.
57. *Cudahy, J.J., Helsel, R.W.* // Waste Management. 2000. V. 20(5–6). P. 339.
58. *Pudvay M.L.* // Official Proceedings. International Water Conference. 2005. V.66<sup>th</sup>. No. 2. P. 813.

---

## TECHNOLOGY FOR REMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH CHLORINE-CONTAINING TOXIC AGROCHEMICALS

*Yu. A. Eleev\*, M. V. Korol'kov, N. Yu. Simonova, V. V. Afanas'ev, and V. V. Surovtsev*

Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Organic Chemistry and Technology",  
Moscow, Russia,\*e-mail: dir@gosniokht.ru

Received October 20, 2017

**Abstract** – The main known remediation techniques for cleaning up contaminated territories are reviewed. A procedure for remediation of soils contaminated with chlorine-containing toxic compounds (i.e. hexachlorobenzene, hexachlorocyclohexane) is proposed. The technology involves thermal detoxification of contaminated soils in a drum-type furnace within the temperature range of 700–800°C, followed by reburning of residual organic substances in an afterburner and subsequent conditioning at 1200°C under excess of oxygen of no less than 3% within 2–3 seconds. The effectiveness of the developed technology has been confirmed in experimental conditions as exemplified by successful neutralization of soils contaminated with hexachlorobenzene and hexachlorocyclohexane with the initial content of these toxicants of 18,29 mg/kg and 4,26 mg/kg, respectively. Basing on the comparative analysis performed, as well as on the calculations carried out, a technological scheme of the appropriate industrial plant (comprising a gas cleaning system) has been designed.

*Keywords:* pesticides, agrochemicals, contaminated soils, thermal detoxification, persistent organic pollutants.