

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»  
(КНИТУ-КАИ)

Институт автоматики и электронного приборостроения

Кафедра промышленной и экологической безопасности

Направление подготовки: 20.03.01 «Техносферная безопасность»

Профиль: «Защита в ЧС»

К защите допустить

Зав. каф. \_\_\_\_\_

Муравьева Е.В.

«01» июня 2021г.

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему: «Снижение вероятности возникновения ЧС на полигоне ТБО  
путем использования пиролизных установок»

ОБУЧАЮЩАЯСЯ	<u>Шумихина Юлия Андреевна</u> (фамилия, имя, отчество)	_____ (подпись)
РУКОВОДИТЕЛЬ	<u>кандидат технических наук, доцент кафедры ПЭБ Валеева Ксения Анатольевна</u> (ученая степень, звание, фамилия, имя, отчество)	_____ (подпись)

Казань 2021 г.

# Reducing the probability of an emergency at the landfill by using pyrolysis plants

By  
*Shumikhina Yuliya Andreevna*

Submitted to the Department of Industrial and Environmental Safety

in partial fulfillment of the Requirements for the degree of

BACHELOR OF SCIENCE

at the

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI»  
(KNRTU-KAI)

Author	_____	<u>Shumikhina Yuliya Andreevna</u>
	<i>(signature)</i>	
Supervisor	_____	<u>Valeeva Kseniya Anatolyevna</u>
	<i>(signature)</i>	Ph.D. of Engineering Sciences, Department of Industrial and environmental safety
Certified by	_____	<u>Muravyova Elena Viktorovna</u>
	<i>(signature)</i>	Professor, Head of the Department of Industrial and environmental safety
date	_____	

Kazan 2021

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»  
(КНИТУ-КАИ)**

Институт автоматики и электронного приборостроения  
Кафедра Промышленной и экологической безопасности  
Направление подготовки/специальность: 20.03.01 «Техносферная безопасность» профиля  
подготовки «Защита в ЧС»

**ЗАДАНИЕ**

на выпускную квалификационную работу

обучающегося Шумихиной Юлии Андреевны  
(фамилия, имя, отчество)

1 Тема выпускной квалификационной работы: Снижение вероятности возникновения ЧС на полигоне ТБО путем использования пиролизных установок  
утверждена приказом №1917-с от «15» апреля 2021г.

2 Срок сдачи обучающимся законченной ВКР «1» июня 2021г.

3 Исходные данные к выпускной квалификационной работе Произвести оценку эффективности внедрения установки быстрого пиролиза в цикл обращения с отходами для снижения вероятности возникновения ЧС. Провести анализ причин возникновения пожара на полигоне ТБО, обосновать целесообразность применения пиролизных установок

4 Перечень подлежащих разработке вопросов и исходные данные к ним:

- 4.1. Изучить нормативно-правовую базу в области обращения с отходами и пожарной безопасности
- 4.2. Провести анализ причин возникновения пожара на полигоне ТБО, произвести оценку возможных последствий с учетом наличия пластика
- 4.3. Изучить методы и средства переработки ТБО
- 4.4. Изучить и описать пиролизную установку и технологический процесс её работы
- 4.5. Произвести необходимые расчеты возможных последствий при возгорании пластика на полигоне

5 Перечень графического материала (при наличии):

Графический материал представлен в виде схемы пиролизной установки Г-1,5 в пояснительной записке, а также в презентационном материале

6 Консультанты по ВКР (при их наличии, с указанием относящихся к ним разделов):  
Раздел 2, Муравьева Е.В.

Дата выдачи задания «25» февраля 2021г.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ Валеева К.А.  
(подпись) (ФИО)

Задание к исполнению принял \_\_\_\_\_ Шумихина Ю.А.  
(подпись) (ФИО)

## Календарный план выполнения ВКР

№ п/п	Наименование этапов (разделов) выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов (разделов) ВКР	Примечание
1.	Выдача задания к дипломной работе, определение цели и задач	25.02.2021	
2.	Изучение и анализ нормативно правовой базы	26.02-8.03.21	
3.	Исследование и анализ причин возникновения пожаров на полигонах ТБО, сведения об обращении с ТБО	9.03-19.03.21	
4.	Обзор существующих пиролизных установок	20.03-24.03.21	
5.	Изучение работы и применение установки быстрого пиролиза Г-1,5	25.03.-6.04.21	
6.	Обоснование применения установки Г-1,5	6.04-12.04.21	
7.	Расчёт необходимого количества воздуха для горения в газификаторе	13.04-17.04.21	
8.	Расчёт объема продуктов горения и геометрических размеров камеры дожига	18.04-26.04.21	
9.	Определение параметров вентилятора	27.04-1.05.21	
10.	Определение тяжести последствий в рез-те возгорания пластика на полигоне	2.05-6.05.21	
11.	Расчёт концентрации вредных веществ	7.05-13.05.21	
12.	Оформление расчётно-пояснительной записки и презентации	14.05-21.05	

Обучающийся \_\_\_\_\_  
(подпись)
(Фамилия, инициалы)
(дата)

Руководитель \_\_\_\_\_  
(подпись)
(Фамилия, инициалы)
(дата)

## Оглавление

Аннотация.....	7
Annotation.....	8
Введение .....	9
Раздел 1. Теоретическое обоснование.....	11
1.1 Анализ нормативно-правовой базы в области обращения с отходами и пожарной безопасности .....	11
1.2 Сведения об обращении с ТБО .....	16
1.3 Методы обращения с ТБО .....	18
1.4 Сведения о произошедших пожарах и ЧС на полигонах ТБО.....	22
1.5 Причины пожаров и возможные последствия .....	24
Раздел 2. Обоснование применения пиролизной установки.....	28
2.1 Снижение вероятности возникновения ЧС.....	30
2.2 Пиролиз.....	33
2.3 Обзор существующих пиролизных установок.....	36
2.4 Установка быстрого пиролиза Г-1,5.....	38
2.5 Преимущества перед мусоросжиганием и причины нераспространенности пиролизных установок .....	41
Раздел 3. Расчётная часть.....	42
3.1 Вычисление необходимого количество воздуха для горения в газификаторе .....	43
3.2 Вычисление необходимого количество воздуха для горения в камере дожига .....	45
3.3 Вычисление объема продуктов горения.....	46
3.4 Расчет геометрических размеров камеры дожига .....	47
3.5 Тепловой баланс процесса горения. Расчёт температуры горения .....	48
3.6 Определение параметров вентилятора .....	50
3.7 Определение тяжести последствий в результате возгорания пластика на полигоне.....	51

3.8 Расчёт концентраций вредных веществ .....	55
Заключение .....	60
Conclusion .....	62
Список использованных источников и литературы .....	64

## Аннотация

Данная выпускная квалификационная работа подготовлена на тему «Снижение вероятности возникновения ЧС на полигоне ТБО путем использования пиролизных установок».

Цель работы: оценка эффективности внедрения установки быстрого пиролиза в цикл обращения с отходами для снижения вероятности возникновения ЧС

Актуальность: проблема необходимости снижения вероятности возникновения ЧС является актуальной в настоящее время, так как количество образующихся и вывозимых на полигоны ТБО растет с каждым годом, а вместе с этим возрастает и риск возникновения пожаров с выделением высокотоксичных веществ и связанных с ними ЧС.

В первой части работы произведен анализ нормативно-правовой базы и существующего положения в области обращения с ТБО и пожарной безопасности.

Вторая часть включает в себя обоснование применения пиролизных установок, их обзор и описание технологического процесса исследуемой установки быстрого пиролиза Г-1,5.

В третьей части произведены расчёты, выявляющие необходимые параметры для обеспечения работы установки и расчёты потенциального негативного воздействия на окружающую среду в случае отсутствия применения пиролизной установки.

## **Annotation**

This final qualification work was prepared on the topic "Reducing the probability of an emergency at a solid waste landfill by using pyrolysis plants".

The purpose of the work: the introduction of a rapid pyrolysis plant in the waste management cycle to reduce the likelihood of an emergency

Relevance: the problem of the need to reduce the probability of an emergency is currently relevant, since the number of solid waste generated and exported to landfills is growing every year, and along with this, the risk of fires with the release of highly toxic substances and related emergencies increases.

In the first part of the work, the analysis of the regulatory framework and the current situation in the field of solid waste management and fire safety is carried out.

The second part includes the justification for the use of pyrolysis plants, their review and description of the technological process of the G-1.5 rapid pyrolysis plant under study.

In the third part, calculations are made that identify the necessary parameters for ensuring the operation of the plant and calculations of the potential negative impact on the environment in the absence of the use of a pyrolysis plant.



## Введение

В настоящее время самым распространенным способом очистки городов от твердых бытовых отходов (ТБО) является захоронение их на полигонах, где они складируются и постепенно разлагаются. Основной опасностью данного метода являются пожары, тяжесть последствий от которых возрастает с увеличением количества мусора на полигонах и развитием промышленности (особенно в области полимерных материалов).

Известны случаи, когда пожары на полигонах становятся поводом для введения режима ЧС. То есть данная проблема может представлять действительно серьезную угрозу для населения, прежде всего, по двум причинам:

- 1) Появляется риск распространения огня за пределы полигона, например, на лесной массив или на населенные пункты;
- 2) Полигон ТБО и в обычном состоянии является источником выброса вредных веществ в атмосферу, а в случае пожара их количество сильно возрастает, превышая допустимые пределы, и наносит ущерб здоровью местных жителей. Особенно сильно страдают люди с заболеваниями дыхательных путей. В основном выделяются такие вещества, как: угарный газ, сероводород, аммиак, водород и диоксины.

Диоксины представляют особую опасность, так как являются мощнейшими канцерогенными ядами, которые накапливаются в организме человека и вызывают мутагенные изменения.

Таким образом, полигон ТБО является потенциальным источником ЧС, и одним из основных компонентов, представляющих серьезную опасность, является пластик, т.к. выделяет при возгорании большое количество высокотоксичных вредных веществ. Решить данную проблему может помочь сокращение количества мусора, ввозимого на полигоны (чем больше площадь полигона, тем выше опасность возгорания и тяжесть последствий) и сокращение количества пластика путем его отсортировки и переработки. Одним из перспективных направлений в этой области является использование пиролизной установки, которая будет подробнее рассмотрена далее.

**Объект исследования:** снижение вероятности возникновения ЧС на полигонах ТБО с выбросом высокотоксичных веществ, которые способны нанести ущерб здоровью людей

**Предмет исследования:** возможность применения технологической установки быстрого пиролиза для переработки пластика

**Цель работы:** оценка эффективности внедрения установки быстрого пиролиза в цикл обращения с отходами для снижения вероятности возникновения ЧС

**Задачи:**

- Изучить нормативно-правовую базу в области обращения с отходами и пожарной безопасности;
- Провести анализ причин возникновения пожара на полигоне ТБО и оценить возможные последствия с учетом наличия пластика;
- Изучить существующие методы и средства переработки;
- Обосновать целесообразность применения пиролизных установок;
- Изучить и описать пиролизную установку и технологический процесс её работы;
- Провести необходимые расчеты.

## Раздел 1. Теоретическое обоснование

### 1.1 Анализ нормативно-правовой базы в области обращения с отходами и пожарной безопасности

Согласно Федеральному закону № 68-ФЗ от 21 декабря 1994 года «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»:

**Чрезвычайная ситуация** – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

**Зона чрезвычайной ситуации** - это территория, на которой сложилась чрезвычайная ситуация.

**Предупреждение чрезвычайных ситуаций** - это комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь в случае их возникновения.

**Границы зоны ЧС** определяются согласно Постановлению Правительства РФ от 21 мая 2007 г. N 304 "О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" и подразделяются на:

а) чрезвычайную ситуацию локального характера, в результате которой территория, на которой сложилась чрезвычайная ситуация и нарушены условия жизнедеятельности людей (далее - зона чрезвычайной ситуации), не выходит за пределы территории организации (объекта), при этом количество людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью, составляет не более 10 человек либо размер ущерба окружающей природной среде и материальных потерь (далее - размер материального ущерба) составляет не более 240 тыс. рублей;

б) чрезвычайную ситуацию муниципального характера, в результате которой зона чрезвычайной ситуации не выходит за пределы территории

одного муниципального образования, при этом количество людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью, составляет не более 50 человек либо размер материального ущерба составляет не более 12 млн. рублей, а также данная чрезвычайная ситуация не может быть отнесена к чрезвычайной ситуации локального характера;

в) чрезвычайную ситуацию межмуниципального характера, в результате которой зона чрезвычайной ситуации затрагивает территорию двух и более муниципальных районов, муниципальных округов, городских округов, расположенных на территории одного субъекта Российской Федерации, или внутригородских территорий города федерального значения, при этом количество людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью, составляет не более 50 человек либо размер материального ущерба составляет не более 12 млн. рублей;

г) чрезвычайную ситуацию регионального характера, в результате которой зона чрезвычайной ситуации не выходит за пределы территории одного субъекта Российской Федерации, при этом количество людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью, составляет свыше 50 человек, но не более 500 человек либо размер материального ущерба составляет свыше 12 млн. рублей, но не более 1,2 млрд. рублей;

д) чрезвычайную ситуацию межрегионального характера, в результате которой зона чрезвычайной ситуации затрагивает территорию двух и более субъектов Российской Федерации, при этом количество людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью, составляет свыше 50 человек, но не более 500 человек либо размер материального ущерба составляет свыше 12 млн. рублей, но не более 1,2 млрд. рублей;

е) чрезвычайную ситуацию федерального характера, в результате которой количество людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью, составляет свыше 500 человек либо размер материального ущерба составляет свыше 1,2 млрд. рублей. [1]

Согласно Федеральному закону от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 07.04.2020) "Об отходах производства и потребления":

**Обращение с отходами** - деятельность по сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов;

Основными принципами государственной политики в области обращения с отходами являются:

- охрана здоровья человека, поддержание или восстановление благоприятного состояния окружающей среды и сохранение биологического разнообразия;
- научно обоснованное сочетание экологических и экономических интересов общества в целях обеспечения устойчивого развития общества;
- использование наилучших доступных технологий при обращении с отходами;
- комплексная переработка материально-сырьевых ресурсов в целях уменьшения количества отходов;
- использование методов экономического регулирования деятельности в области обращения с отходами в целях уменьшения количества отходов и вовлечения их в хозяйственный оборот;
- доступ в соответствии с законодательством Российской Федерации к информации в области обращения с отходами;
- участие в международном сотрудничестве Российской Федерации в области обращения с отходами.

Упаковка из полимерных материалов, не содержащих галогены (PET, HDPE, LDPE, PP, PS) и упаковка из полимерных материалов, содержащих галогены (PVC) согласно ст.24.2 89-ФЗ входят в перечень товаров, упаковки товаров, подлежащих утилизации после утраты ими потребительских свойств. Данный перечень устанавливается Правительством Российской Федерации с учетом возможных социально-экономических последствий, а также уровня и объема негативного воздействия на окружающую среду, связанного с утратой потребительских свойств такими товарами. [2]

Согласно Федеральному закону от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 27.12.2018) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" к опасным факторам пожара, воздействующим на людей и имущество, относятся:

- 1) пламя и искры;
- 2) тепловой поток;
- 3) повышенная температура окружающей среды;

- 4) повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения;
- 5) пониженная концентрация кислорода;
- 6) снижение видимости в дыму. [3]

При возгорании на полигоне наибольшую опасность представляет фактор под номером 4.

Метод экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов представлен в пункте 4.20 ГОСТ 12.1.044-89

В целях обеспечения безопасности населения и в соответствии с Федеральным законом "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 N 52-ФЗ вокруг объектов и производств, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека устанавливается специальная территория с особым режимом использования (далее - санитарно-защитная зона (СЗЗ), размер которой обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух (химического, биологического, физического) до значений, установленных гигиеническими нормативами.

Размер санитарно-защитной зоны от жилой застройки до границ полигона - 500 м. Кроме того, размер санитарно-защитной зоны может уточняться при расчете газообразных выбросов в атмосферу. Границы зоны устанавливаются по изолинии 1 ПДК, если она выходит из пределов нормативной зоны. Уменьшение санитарно-защитной зоны производится в установленном порядке. На участке, намеченном для размещения полигона для бытовых отходов, проводятся санитарное обследование, геологические и гидрологические изыскания. Перспективными являются места, где выявлены глины или тяжелые суглинки, а грунтовые воды находятся на глубине более 2 м. Не используются под полигоны болота глубиной более 1 м и участки с выходами грунтовых вод в виде ключей. Целесообразно участки под полигоны выбирать с учетом наличия в санитарно-защитной зоне зеленых насаждений и земельных насыпей.

Участок для устройства полигона ТБО должен отводиться в соответствии с утвержденным генеральным планом или проектом планировки и застройки города и его пригородной зоны. Полигон для твердых бытовых отходов желательно размещать на ровной территории, исключая

возможность смыва атмосферными осадками части отходов и загрязнения ими прилегающих земельных площадей и открытых водоемов, вблизи расположенных населенных пунктов. Допускается отвод земельного участка под полигоны ТБО на территории оврагов, начиная с его верховьев, что позволяет обеспечить сбор и удаление талых и ливневых вод путем устройства перехватывающих нагорных каналов для отвода этих вод в открытые водоемы [5].

68 ФЗ характеризует ЧС в зависимости от масштаба (пожар на полигоне ТБО способен привести к ЧС муниципального или межмуниципального характера, подвергая опасности территорию в пределах одного муниципального образования или выходя за его пределы.

Режим ЧС вводят органы гос.власти и местного самоуправления.

Согласно 89 ФЗ к одному из основных принципов в области обращения с отходами относится использование наилучших доступных технологий при обращении с отходами.

Согласно 123 ФЗ при возгорании на полигоне наибольшую опасность представляет такой опасный фактор пожара, как повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения.

«ограничение массы и (или) объема горючих веществ и материалов» - один из способов исключения условий образования горючей среды.

Согласно 7 ФЗ, вещества, выделяемые при пожаре на полигоне (диоксины, угарный газ и т.д.) относятся к перечню загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды

Согласно 52 ФЗ к одному из средств обеспечения благополучия населения относится проведение научных исследований в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения

Согласно СанПиН 2.1.7.722-98 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов размер СЗЗ от жилой застройки до границ полигона составляет 500м.

## 1.2 Сведения об обращении с ТБО

В России на полигон отправляются 90-95% отходов.

В среднем принято считать, что на одного жителя в год накапливается 250 кг мусора. [8]

Образование отходов в РФ увеличилось с 3734 млн.т в 2010 до 9282 млн.т в 2020, то есть более, чем в 2 раза



Рисунок 1. Сведения об образовании отходов в РФ

В Росприроднадзоре говорят, что это связано с активным использованием упаковочных материалов: полиэтилена, пластика, бумаги.

Из всего объема отходов, вывозимых на полигон в 2020 году, половину составил пластик. В основном это упаковки из-под продуктов.

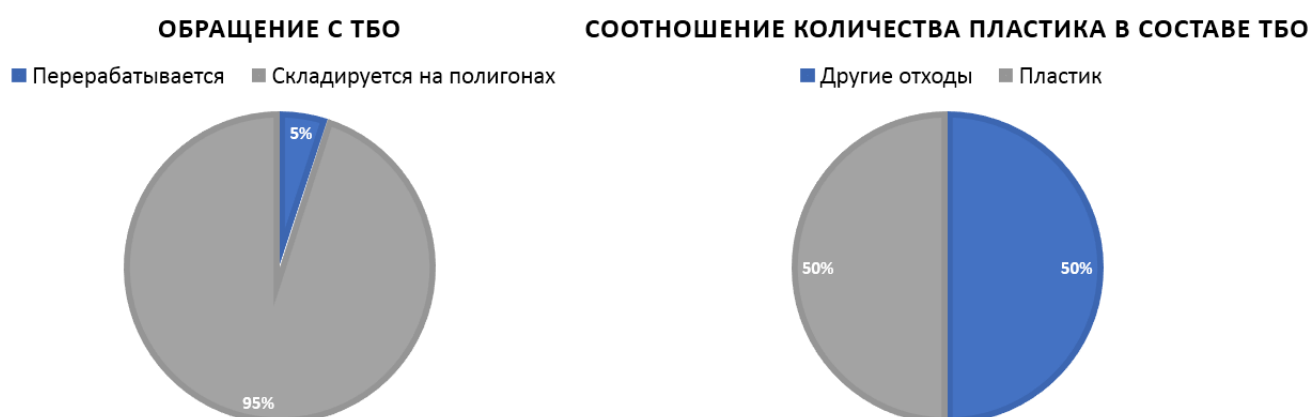


Рисунок 2. Существующее положение в области обращения с ТБО



## **Существующее положение в сфере обращения с ТБО в г. Казань**

Ежедневно на полигон «Восточный» вывозится 1 600 тонн мусора.

$1\ 600 * 365 = 584\ 000$  тонн = 0,6 млн тонн в год.

Образующиеся отходы отправляются на полигон «Восточный», который был открыт в 2017 году и к настоящему времени первая его часть уже почти заполнена, поэтому планируется открытие следующего звена. Но жители жалуются на образующийся запах и проблемы со здоровьем, в связи с чем выступают против расширения полигона и за альтернативные методы обращения с отходами.

### 1.3 Методы обращения с ТБО

В настоящее время существуют следующие методы обращения с ТБО:

**Захоронение** – послойная укладка на специально оборудованной территории грунта и отходов с последующим уплотнением бульдозерами.

**Сжигание** – с одной стороны уменьшает объем отходов в 10 раз и является источником тепловой энергии, а с другой сопровождается выбросом в воздух большого количества высокотоксичных газов и образованием золы.

**Компостирование** – разложение отходов естественным путем, требует предварительной сортировки и подходит только для безопасных отходов, не пользуется особой популярностью.

**Переработка** – наиболее экологичный, эффективный и сохраняющий ресурсы планеты метод переработки. Но, к сожалению, не все отходы можно переработать во вторичный продукт. Для таких отходов нужен иной способ утилизации. В таком случае лучшим решением будет пиролиз.

**Пиролиз** – термическое разложение вещества при недостатке кислорода. В результате образуется пиролизный газ (в состав которого входит метан, оксид углерода, водород), который может обеспечивать теплом потребителей в радиусе до 3х км, жидкий продукт и твердый углеродистый остаток. [7]

Преимущество перед классическим сжиганием заключается в том, что сокращается количество вредных выбросов, а на выходе можно получить пиролизный газ и жидкий продукт.

Наиболее рациональным решением проблемы излишнего образования отходов и возможности возникновения связанных с ними ЧС будет применение следующей последовательности:

1. Сокращение производства отходов
2. Сортировка и переработка вторсырья и органики
3. Использование непереработанных фракций в качестве топлива
4. Захоронение остатков [10]

В качестве примера рассмотрим работу **комплекса по переработке отходов в Москве:**

КПО «Восток» обладает мощностью до 1,2 млн тонн отходов в год. И самое важное, что количество перерабатываемых отходов достигает 75% (это значительно превышает национальные цели, которые предполагают сокращение захоронения отходов до 50% к 2030 году).

Отходы привозят в грузовиках двух видов: синие – с сухим вторсырьем, серые – со смешанными отходами.

На начальном этапе отбирают крупногабаритный мусор, чтобы не образовывалось заторов на следующих этапах, и разрывают пакеты. Затем отходы проходят несколько этапов ручной и механической сортировки, отделяется вторсырье и органические отходы. Вторсырье затем отправляется на заводы-переработчики, а органические отходы компостируются в специальных условиях.

Оставшийся неперерабатываемый пластик отправляется на изготовление RDF-топлива. Рассмотрим этот этап подробнее, т.к. здесь возможно применение различных технологий, в том числе пиролизных установок.

### **RDF топливо**

RDF-топливо, или Refuse Derived Fuel, – топливо, которое состоит из оставшихся после сортировки отходов.

Считается, что такое топливо хорошо и правильно горит там, где есть высокие температуры, и происходит термическое разложение (пиролиз) сложных и опасных газообразных продуктов сгорания, превращающее их в обычные дымовые газы.

Использовать такое топливо можно, например, на цементных заводах. Потребность цементной отрасли в этом топливе достаточна. Например, цементный завод, расположенный в Коломне Московской области, при наличии технологических возможностей, мог бы сжигать 25 тысяч тонн RDF топлива в год.

По оценкам экспертов из ТБО в РФ, потенциально можно получать 11 млн. тонн вторичного топлива в год. Этого топлива хватило бы для производства около 27 млн. тонн цемента в год. Если сравнить RDF по тепловым показателям с газом, то ориентироваться надо на то, что 1 м<sup>3</sup> газа эквивалентен 1,7 кг RDF.

## **Негативное влияние полигонов на жителей близлежащих территорий**

Комплексный подход в обращении с ТБО пока не удалось внедрить повсеместно, и в настоящее время наиболее распространенным методом является захоронение отходов на полигонах, где они складируются и постепенно разлагаются. Данный способ является самым худшим из всех возможных, так как в результате разложения отходов выделяются вредные вещества.

Помимо этого, полигоны подвержены возгоранию, органические и полимерные составляющие становятся топливом для огня. А крупные масштабы свалок со своим многообразным составом при возгорании могут стать причиной для введения режима ЧС.

Согласно *СанПиН 2.1.7.722-98 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов* размер санитарно-защитной зоны от жилой застройки до границ полигона - 500 м.

Но, как показывают факты, не обеспечивают комфортное проживание жителей даже при стабильном состоянии полигонов (без возгораний). Со слов жительницы населенного пункта, расположенного недалеко от полигона «Восточный»: «Окна в квартирах открыть невозможно. У взрослых усилилась слезоточивость глаз, появилась сухость в носу, аллергия, атипические дерматиты. Все это появилось за последний год. Пока нам сообщают о том, что бóльшая часть свалок — недействующая. Но мы видим обратное. Мусор все так же привозят и сваливают. Поэтому мы бы хотели, чтобы эту свалку (полигон „Восточный" — прим. ред.) закрыли и рекультивировали! А еще мы выступаем за отдельный сбор мусора, чтобы он не только собирался жителями, но и перерабатывался, не попадал на свалку вместе с остальными отходами.

Если полигон будут расширять, для нас это вообще беда, катастрофа. Неужели подобного не понимают руководители? Мы везде пишем, неужели нам никто не может помочь?»

Таким образом, огромное количество мусора на полигонах представляет большую проблему для жителей, которые в свою очередь выступают за переработку отходов. И пока маленькими шагами переработка отходов будет внедряться в массы, большие объемы вторсырья по-прежнему будут попадать

на полигоны. Данная ситуация усугубляется в десятки и сотни раз в случае возгорания полигона. Это связано с тем, что интенсивность выброса вредных веществ увеличивается и они разносятся по воздуху вместе с токсичным дымом и отравляют жителей.

Далее будут рассмотрены произошедшие пожары на полигонах и чрезвычайные ситуации, к которым они привели, а также причины и последствия этих пожаров.

## 1.4 Сведения о произошедших пожарах и ЧС на полигонах ТБО

26.05.2017 в 12.45 произошло возгорание части полигона твердых бытовых отходов ПАО «Экосервис», расположенного в г. Альметьевск Республики Татарстан. Площадь возгорания составила 2000м<sup>2</sup>, в тушении задействовано 76 единиц техники, в т.ч. 2 оперативных штабных авто, 2 мотопомпы, 1 топливозаправщик, 6 водовозов, 30 самосвалов, 4 бульдозера, 5 погрузчиков, 8 экскаваторов, 4 пожарные машины, 108 человек. Государственным инспектором Управления Росприроднадзора по Республике Татарстан осуществлен выезд на полигон с привлечением лаборатории для отбора проб атмосферного воздуха. За несоблюдение экологических требований при эксплуатации объекта размещения отходов, несоблюдение экологических требований при обращении с отходами и несвоевременное сообщение полной и достоверной информации о состоянии окружающей среды, об источниках загрязнения окружающей среды лицами, обязанными сообщать такую информацию составлены протоколы об административных правонарушениях по ст. 8.1, 8.2, 8.5 КоАП РФ на юридическое лицо и должностное лицо ПАО «Экосервис». Возгорание полностью ликвидировано 29.05.2017.

Пожар на полигоне ТБО во Владивостоке. Площадь пожара составила 500м<sup>2</sup>. Причиной стало отсутствие системы газоудаления на площадке.

Пожар в Ярославле 7.07.20. Причина - самовозгорание в результате высокой температуры воздуха, как следствие, нагрева солнечными лучами участка, где работа не велась.

16.03.21. Пожар на полигоне в Якутске. Площадь пожара – 3 000м<sup>2</sup>. Горение происходит в нижних пластах.

29.01.21 Возгорание полигона в Норильске продолжительностью полугода. Нет возможности добраться до очага пожара и потушить его, т.к. он находится на глубине 8-12м. Жители жалуются на постоянное задымление.

24.07.2018 **Режим ЧС** введен в Черногорске из-за пожара на полигоне ТБО. Угрозой для жителей стало задымление.

В 2019 в Чите ввели режим ЧС, из-за сильного ветра огонь распространился на площади около 2,5 гектара. Возможные причины – отсутствие изоляции грунтом, наличие на полигоне сухих веток.



Веден режим ЧС



Веден режим ЧС



11.07.20  
Полигон  
«Восточный»



г.Якутск,  
16.03.21

Рисунок 3. Сведения о произошедших пожарах и ЧС на полигонах ТБО

## 1.5 Причины пожаров и возможные последствия

Пожар возникает в случае наличия трех составляющих – горючего вещества, кислорода и источника тепла. В случае пожара на полигоне в этих ролях могут выступить следующие факторы:

Горючее вещество - мусор при гниении выделяет легковоспламеняемый газ (этан, метан, пропан), который выступает в роли горючего вещества для огня – излишнее скопление этого газа может привести к взрыву или пожару (опасной считается концентрация 5-15%), особенно при отсутствии систем газоудаления. Другим источником горючего может служить пластик, который в значительной степени состоит из углеводорода. При разложении распадается на углерод и водород, которые при воздействии кислорода вступают в химическую реакцию окисления, становятся источником возгорания или поддерживают горение;

Источник тепла - возгорание сухостоя около полигона; выгрузка отходов, находящихся в состоянии тления; самовозгорание в результате высокой температуры воздуха; поджог с целью получения цветных металлов;

Кислород - недостаточное уплотнение слоя тбо (попадает кислород в нижние слои грунта, реакции разложения дают тепло и материал начинает самовоспламеняться) или отсутствие изоляции тбо грунтом, в следствие чего образуются воздушные полости.

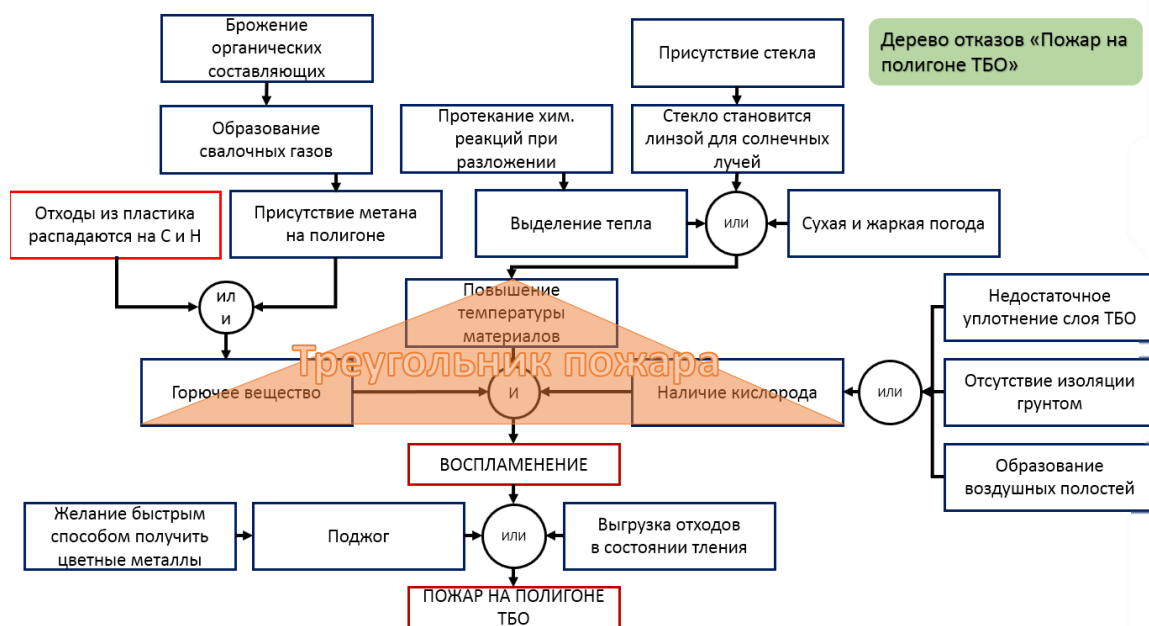


Рисунок 4. Дерево отказов «Пожар на полигоне ТБО»



## Возможные последствия

Наиболее опасным фактором является превышение в воздухе токсичных веществ (сажи и оксида углерода) и их распространение на населенные пункты. Например, при возгорании полигона ТБО в Петербурге (2011 год) погиб человек, жителям запретили выходить из дома из-за содержания в воздухе вредных веществ.

При сгорании твердых бытовых отходов происходит выброс диоксинов – мощнейших канцерогенных ядов, которые накапливаются в организме человека и вызывают мутагенные изменения. Диоксины имеют свойство годами отравлять организм человека и животных, более того, они накапливаются по пищевым цепям. Канцерогенные вещества с тлеющей свалки воздействует на все живое в радиусе 24 километров. [8]

На рисунке 5 в графическом виде представлен алгоритм, по которому пожар на полигоне ТБО становится поводом для введения ЧС и какую роль в нем играют углеродосодержащие компоненты, которые могут быть переработаны в исследуемой установке.

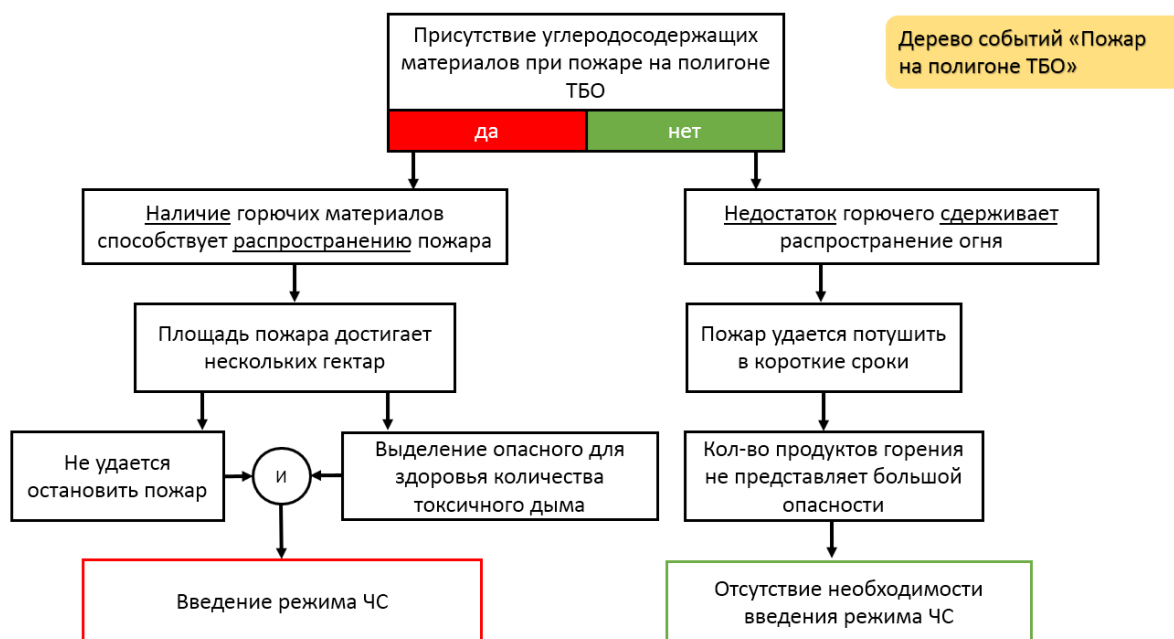


Рисунок 5. Дерево событий «Пожар на полигоне ТБО»

Последствия от сгорания пластика зависят от его состава. Характеристика этих последствий представлена на рис. 6.

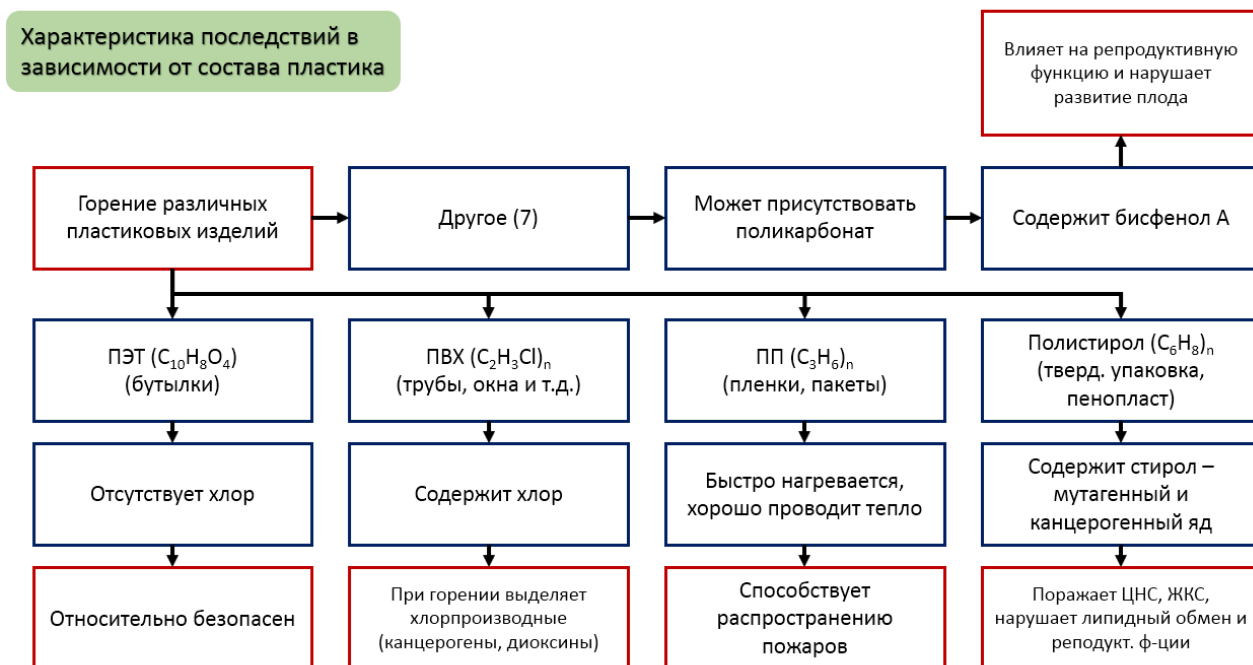


Рисунок 6. Характеристика последствий сгорания пластика в зависимости от его состава

Одним из наиболее распространенных видов пластика является ПЭТ (полиэтилентерефталат), из него делают бутылки, упаковки в виде контейнеров и т.д. Но ПЭТ в своей структуре содержит бензольное кольцо, что делает его потенциальным источником канцерогенов, которые выделяются при нагревании и сжигании.

Но можно избежать этих последствий, отправив данный вид пластика на переработку - в зависимости от качества сырья из него можно вновь сделать тару для напитков или бытовой химии, ряд тканей: лавсан, полартек, флис.

Другим распространенным пластиком является полипропилен (ПП), он более безопасен для окружающей среды, но в случае возникновения пожара способствует поддержанию и распространению горения.

Переработка данного вида пластика во вторичные ресурсы осуществляется не так активно, как в случае с ПЭТ, т.к. его сложно отличить от других видов пластика и он труднее очищается от загрязнений, поэтому для материалов из полипропилена лучшим вариантом будет переработка в

пиролизной установке. Это позволит сократить масштабы пожара в случае его возникновения и получить топливный ресурс.

Наиболее опасными видами пластика является поливинилхлорид (ПВХ) – т.к. выделяет хлор – ядовитое вещество, которое повреждает слизистую оболочку дыхательных путей, вплоть до остановки дыхания, полистирол – т.к. содержит в своем составе стирол – яд, поражающий ЦНС, липидный обмен, репродуктивные органы – помимо этого его достаточно сложно использовать для переработки во вторичные ресурсы, а значит он отлично подойдет для пиролиза.

А также опасными являются материалы из пластика с маркировкой 7 – другое. Это материалы, содержащие в своем составе различные компоненты, в том числе ядовитое вещество – бисфенол А – которое нарушает репродуктивные функции и развитие плода.

### **Микропластик**

Другим опасным последствием присутствия пластика на полигонах и в окружающей среде является микропластик - частицы пластика размером менее пяти миллиметров. Он образуется в результате разложения пластика под воздействием внешних факторов, таких как солнечные лучи, низкие температуры. Например, на морозе пластиковый пакет замерзает, трескается, нарушается его структура, и он попадает в окружающую среду в виде микропластика. В таком виде он легко переносится по воздуху, при вдыхании оседает в легких и способствует развитию респираторных заболеваний. Другим путем для микропластика являются водоемы, где он становится нижним звеном пищевой цепочки и снова имеет шансы попасть в организм человека. В пластике часто есть токсичные примеси, например, красители и огнестойкие добавки, которые попадают в пищеварительную систему животных и могут вызывать повреждения органов, воспаление кишечника и влиять на репродукцию. К тому же, микрочастицы легко впитывают другие токсичные вещества, например, пестициды и диоксины, а потом так же легко выделяют их в организм, в который они попали.

И лучшим способом остановить этот процесс является профилактика попадания пластика в окружающую среду путем его переработки и предотвращения его скопления на полигонах.

## Раздел 2. Обоснование применения пиролизной установки

Основная проблема заключается в том, что пожар на полигоне ТБО ведет к опасному воздействию токсичных продуктов горения на жителей близлежащих населенных пунктов.

Во-первых, пластик сам по себе является источником выделения опасных веществ, так как содержит в своей структуре бензольное кольцо, канцерогенное как в изолированном виде, так и в соединениях.

А во-вторых, как мы уже выяснили, пластиковые отходы могут занимать половину от всего объема отходов. Чем больше отходов на полигоне, тем выше риск возникновения пожара и тем больше горючих веществ для поддержания огня. А если масштабы пожара будут невелики, то токсичного дыма будет образовываться меньше и количество распространения продуктов горения сократится

Таким образом, применение пиролизных установок позволит снизить количество пластика, вывозимого на полигоны, сокращая тем самым количество вредных выбросов и объем отходов.



Рисунок 7. Обоснование применения пиролизных установок

Пиролизные установки могут применяться как и на начальном этапе обращения с ТБО – перерабатывать весь тот пластик, который жители отправили в мусорное ведро, так и на одном из последних этапов, когда весь пластик, который можно переработать, уже отправлен на переработку, а неперерабатываемые остатки могут использоваться в качестве сырья для РДФ-топлива. Для получения его из пластика отлично подойдет установка быстрого пиролиза Г-1,5, т.к. она способна работать непрерывно, перерабатывая исходный материал в больших количествах, а на выходе выдавать пиролизный газ (который может стать источником тепла) и жидкий продукт, из которого можно также получить топливо или другие материалы при более подробном исследовании и разработке.

## 2.1 Снижение вероятности возникновения ЧС

Пожар возникает со 100% вероятностью в случае наличия и взаимодействия трех факторов (согласно треугольнику пожара): горючего вещества, кислорода и тепла. При отсутствии хотя бы одного из них пожар невозможен.

Выделим участок «дерева отказов», где наглядно видно, как пластик влияет на возникновение пожара и проведем анализ этого участка:

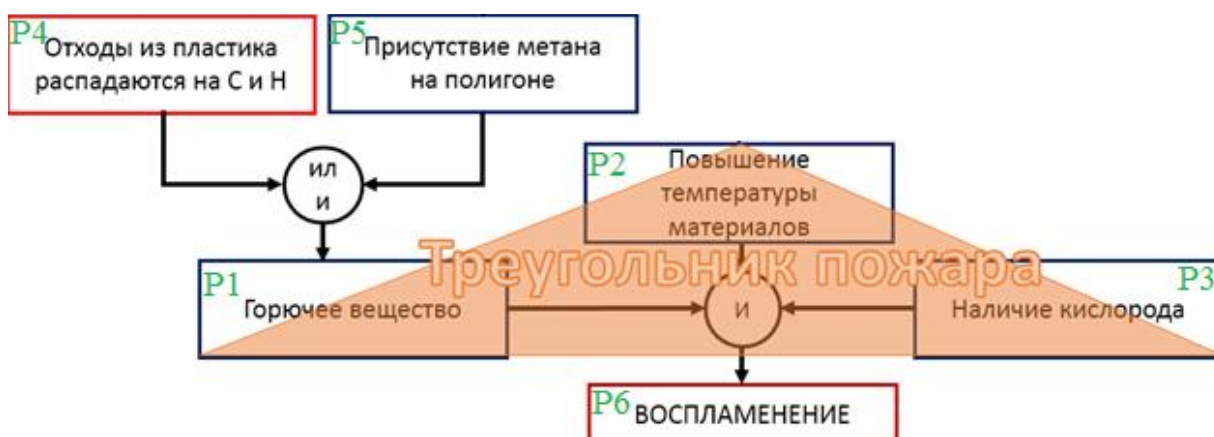


Рисунок 8. Участок "Дерева отказов"

Т.к. воспламенение возможно только в случае наличия 3х факторов, обозначим  $P1, P2, P3 = 1$

В роли горючего вещества в равной степени могут выступать метан из отходов органического происхождения или углеродосодержащие компоненты:

$$P1 = P4 + P5 = 1; P4 = P5 = 0,5$$

(Примечание: помимо пластика к углеродосодержащим компонентам относятся также бумага, древесина, замасленная ветошь, автомобильные покрышки – все эти материалы утилизируются посредством применения исследуемой пиролизной установки)

$$\text{Тогда } P1 = 0,5 + 0,5 = 1$$

При наличии пластика на полигоне вероятность возникновения пожара составит:

$$P6 = P1 * P2 * P3 = (0,5 + 0,5) * 1 * 1 = 1$$

Если количество пластика сократится в 2 раза, то его вклад в возникновение пожара сократится также в 2 раза, тогда вероятность составит:

$$P_6 = P_1 * P_2 * P_3 = P_6 = (0,25 + 0,5) * 1 * 1 = 0,75$$

Если количество пластика сократится в 10 раз:

$$P_6 = P_1 * P_2 * P_3 = P_6 = (0,05 + 0,5) * 1 * 1 = 0,55$$

Если же слагаемое, отвечающее за пластик, будет исключено и обратится в 0, тогда вероятность возгорания составит:

$$P_6 = 0,5 * 1 * 1 = 0,5$$

Таким образом, удаление пластика с полигонов способно снизить вероятность возникновения ЧС до 50%.

### Оценка риска

Риск — это отношение числа неблагоприятных проявлений опасности к их возможному числу за определенный промежуток времени. [21]

$$R = \frac{n}{N}$$

R — риск (1/год); n — число неблагоприятных проявлений опасности за год или иной период; N — число возможных проявлений опасности за тот же период времени.

Из анализа данных за 2019-2020 годы получены следующие сведения:

Год	Кол-во пожаров	Кол-во ЧС, к которым они привели
2019	15	1
2020	19	0
Среднее значение	17	0,5

Количество полигонов в России – 976

Следовательно, получим следующее значение риска:

Риск возникновения пожара на полигоне при существующем положении:

$$R = \frac{17}{976} = 0,0174$$

Риск возникновения ЧС:

$$R = \frac{0,5}{976} = 0,0005$$

Анализ произошедших пожаров показал, что возгорание на полигоне ТБО становится поводом для введения режима ЧС, когда пожар выходит из-под контроля. То есть он достигает площади более 2-3 гектар, длится в течение недели и более, но его никак не удастся потушить. Режим ЧС позволяет своевременно реагировать на ситуацию и привлекать к ее ликвидации силы и средства властей и бюджетов разных уровней.

Продолжительность и быстрое распространение пожара на полигоне ТБО можно объяснить большим количеством легковоспламеняющихся компонентов, входящих в состав отходов, которые могли бы быть изъяты путем применения пиролизной установки.

Было выяснено, что применение пиролизной установки способно снизить вероятность возникновения возгорания в 2 раза, таким образом, величина риска составит:

$$0,0174/2 = 0,0087 \text{ (возгорание)}$$

$0,0005/2 = 0,00025$  (ЧС) - максимальное значение, т.к. при отсутствии легкогорючих материалов пожар не сможет распространяться быстрее, чем его будет возможно потушить.

В таком случае ликвидировать образовавшееся возгорание удастся в короткие сроки, а вероятность возникновения ЧС из-за пожара на полигоне ТБО стремится к 0.



## 2.2 Пиролиз

Процесс пиролиза заключается в том, что под воздействием высоких температур в условиях вакуума сложные органические вещества распадаются на более простые, снижается их молекулярная масса и выделяется большое количество газов.

Данная технология, которая должна вытеснить захоронение отходов. Она позволяет не только разгрузить полигоны ТБО, но и позволяет получать нефтепродукты, что снижает нагрузку на промышленность, в которой они добываются. Кроме того, прибыльность такого предприятия велика: низкие затраты на сырье, наличие его в большом количестве, высокая стоимость конечного продукта.

При пиролизе исходное сырье проходит четыре основные стадии:

1. Сушку в специально предназначенной для этого камере;
2. Непосредственно пиролиз или сухая перегонка отходов;
3. Сжигание остатков;
4. Получение конечного продукта: газа, масла или угля.

Пиролиз ТБО и выход продуктов зависит от того, какой температурный режим применяется. Он может регулироваться. Чтобы уменьшить количество вырабатываемого газа, устанавливаются низкие температуры. В результате получают больше масла и угля. И наоборот, высокотемпературный пиролиз ТБО дает больше газа.

По воздействию разных значений температур на мусор пиролиз делится на низкотемпературный и высокотемпературный. Первый протекает при температуре до  $900^{\circ}\text{C}$ , а второй – при температуре больше  $900^{\circ}\text{C}$ .

Низкотемпературный пиролиз. Технология обработки отходов данным способом заключается в нагревании сырья в шахте до  $350 - 450^{\circ}\text{C}$  без доступа воздуха, то есть при отсутствии как кислорода, так и азота. Стабильная температура и полное отсутствие кислорода гарантируют, что сырье не будет гореть, а также не будет помех для интенсивного протекания таких процессов как нагревание, плавление, испарение, разложение углеродистых соединений. При данном типе пиролиза неважно, каков химический состав

перерабатываемых отходов и в каком соотношении находятся в них органические вещества. [12]

Плюсы пиролиза:

- при утилизации отходов не загрязняется воздух. Нет вредных выбросов, которые, зачастую, опаснее исходного сырья.
- пиролизные установки безопасны для населённых пунктов, которые находятся поблизости. Более того, они могут стать источником энергии для небольших посёлков.
- в качестве сырья для пиролиза выступают твёрдые бытовые отходы с полигонов. Такая технология позволяет переработать даже автомобильные покрышки.
- Продукты пиролиза представляют собой полезные вещества, которые можно использовать в качестве топлива. Эти вещества используются на пиролизных установках для их автономной работы.
- Зольный остаток образуется не в таком большом количестве, как при сжигании.

Минусы пиролиза:

- при низкотемпературном пиролизе не происходит полного распада диоксинов, а тяжёлые металлы не выплавляются.
- пиролизные установки дорогие и сложные в обслуживании.
- низкотемпературные установки требуют большого количества рабочих.

В результате пиролиза из смешанного опасного мусора можно получить достаточное количество полезных материалов:

1. Синтетическая нефть – это жидкая фракция. Она образуется в результате пиролиза пластмасс и покрышек. Это закономерно, ведь эти материалы изготавливают из нефти. Синтетическая нефть напоминает природную. Её можно использовать в чистом виде в качестве топлива для котельных и ТЭЦ, либо переработать в моторное масло.

2. Полукокс – это твёрдая фракция. Она легко воспламеняется, хорошо горит и даёт около 31-35 Мдж/кг при сгорании. Полукокс используется во всех областях, где необходимо высококалорийное топливо.
3. Пиролизный газ – это газообразная фракция. Этот газ по свойствам подобен природному, и может применяться для выработки тепла или электричества.

Технология пиролиза не только решает проблему с утилизацией твёрдых бытовых отходов. Она также способна производить вторичное топливо. Запасы природного топлива, к сожалению, ограничены. Если широко распространить технологию пиролиза, небольшие посёлки и крупные города смогут перейти на использование вторичного топлива. Что касается исходного сырья, то в России достаточно мусора для работы множества пиролизных установок.

## 2.3 Обзор существующих пиролизных установок

### *Пиролизные установки ФОРТАН и ФОРТАН-М*

Производительность – от 4 до 50 тонн в сутки

Пиролизные установки ФОРТАН и ФОРТАН-М предназначены для переработки и утилизации любых углеродосодержащих отходов: шины, пластики, нефтешламы, нефтезагрязненные грунты, отработанные масла, мазут, битум, замасленная окалина, медицинские отходы и др. Полный список отходов включает более 900 наименований.

Сырье не подвергается прямому воздействию огня, теплопередача осуществляется через стенки реторты. Предельные рабочие температуры – 450-520 °С. Крышка реторты изготавливается с затвором специальной конструкции, который обеспечивает полную герметизацию пространства внутри реторты и исключает вероятность дымления. Парогазовая смесь выходит из реторты по трубопроводу, охлаждается в конденсаторе-холодильнике, пары конденсируются, и полученная жидкость отделяется от неконденсирующихся газов.

Жидкость накапливается в сборнике жидкого продукта, газ используется для поддержания процесса пиролиза – направляется на горелку и сжигается в печи. Цена – 1 700 000

### *Пиролизные установки "Реактор"*

Мобильные пиролизные установки-печи для утилизации и переработки отходов. Позволяют перерабатывать до 50 куб. м. различных отходов в сутки. Для переработки можно использовать ТБО (резина, пластик, ткани, макулатура и т. п.), навоз и помет, отходы древесины, отходы сырой нефти и др. Цена – 1 100 000

### *Пиролизная установка LL 2600x6600*

Производительность в сутки до 9 -10 тонн. Объем реактора 25 м3. Занимаемая установкой площадь 100 -120 м2, площадь цеха - 300 -400 м2. Оборудование для пиролизной утилизации отходов

эффективно и экологически безопасно, в процессе работы нет синтеза диоксинов, выделяемые газы дожигаются в топке установки и проходят многоступенчатую очистку.

Пиролизные установки комплектуется 4 ступенчатой системой очистки печных газов, для разогрева реактора может использоваться уголь, дрова, пиролизное масло, дизельное топливо, газ, электричество. Установки комплектуются: полуавтоматической системой выгрузки углерода из реактора, системой удаления металлокорда из установки, Итальянскими горелками для разогрева реактора, Российской адаптированной к холодному климату системой охлаждения, есть возможность использовать выделяемое установкой тепло для отопления цеха и бытовых нужд. Возможна дополнительная поставка загрузочного устройства, автоматической системы удаления и хранения углерода из установки. Возможно поставка пиролизных установок в комплекте с установкой дистилляции пиролизного масла. Система управления установки на комплектующих Siemens.

Цена: 7 600 000

## 2.4 Установка быстрого пиролиза Г-1,5

### Описание установки

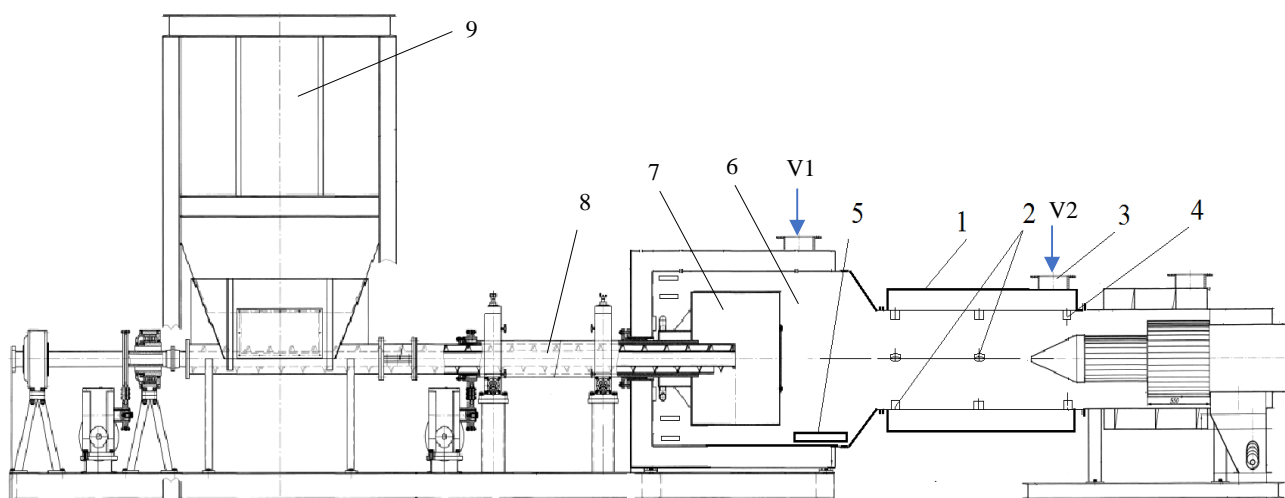


Рисунок 9. Схема технологического процесса утилизации пластика

- 1 – камера дожигания
- 2 – воздушные сопла
- 3 – патрубок подвода воздуха
- 4 – воздушные сопла
- 5 – щелевое окно для улавливания и удаления зольного остатка
- 6 – газификатор
- 7 – пиролитическая камера
- 8 – шнек
- 9 – бункер приема пластика

### Принцип работы установки

Высушенное и измельченное углеродосодержащее сырье (опилки разнородной древесины; ветошь замасленная; шпалы железнодорожные деревянные, пропитанные антисептическими средствами, находящиеся в виде щепы; измельченные камеры и покрышки автомобильные с тканевым кордом; пластик, полиэтилен, ткани синтетические загрязненные, бумага, картон и т.д.) попадает в бункер приёма пластика (9), откуда движется по шнеку (8) в

пиролизную камеру (7), которая располагается внутри газификатора (6), где сырье нагревается и начинает плавиться. Чтобы данный процесс происходил равномерно, внутри камеры располагаются шарообразные механизмы для перемешивания полученной массы. Температура в камере достигает 600 градусов по Цельсию, превышение которой может повредить поверхность камеры. Чтобы этого избежать, воздух подается с коэффициентом избытка воздуха, равным 0,3 (*коэффициент избытка воздуха показывает, во сколько раз количество воздуха, который действительно поступает в зону горения, отличается от теоретически необходимого количества для полного сгорания единицы количества горючего вещества.*) Ограничение количества подаваемого воздуха сдерживает процесс горения для нагрева пиролизной камеры.

2/3 газа выкачивается из пиролизной камеры и по трубе, расположенной внутри шнека (8) и отправляется на конденсацию с целью дальнейшего получения жидкого продукта. А 1/3 пиролизных газов используется для поддержания тепла, обеспечивающего разложение пластика внутри камеры.

Конечным продуктом технологии утилизации вышеуказанных отходов являются: фракции углеводородной жидкости (печное топливо бытовое), полукокс, углерод технический. Подробности состава конечного продукта представлены в Приложении 1.

Тот газ, который используется для поддержания работы установки и затем отправляется в атмосферу, необходимо «дожечь», чтобы токсичные вещества не попали в окружающую среду, т.к. диоксины распадаются и в присутствии водорода образуют неорганические соединения или кислые газы (HCl, HF и т.д.) при температуре от 1200 °C и времени выдержки 2 секунды, для этого они отправляются в газификатор (6). После этого для окончательной очистки газов используется циклон, но перед его применением газ необходимо остудить до 580-600 °C. Для этой цели необходимо подобрать вентилятор и рассчитать количество воздуха, которое он будет подавать в камеру дожига.

В циклоне механические частицы отделяются от газовой фазы и направляются в золоборник. Далее, очищенный от пыли газ направляется в газовую магистраль, включающую в себя: воздушный теплообменник, блок нейтрализации кислых газов, механический фильтр, дымосос, дымовую трубу. В окружающее пространство удаляются продукты сгорания с наименьшим содержанием канцерогенных веществ.

Таким образом, для обеспечения работы пиролизной установки необходимо провести расчёт следующих параметров:

- 1) необходимое количество воздуха для горения в газификаторе (коэффициент избытка воздуха 0,3 – чтобы поддерживать оптимальный режим работы пиролизной камеры);
- 2) необходимое количество воздуха, подаваемого в камеру дожига (коэффициент избытка воздуха 1,0) – чтобы обезвредить газ из пиролизной камеры;
- 3) объем продуктов горения (для камеры дожига) – чтобы рассчитать размеры камеры, в которой полученный объем будет находиться не менее 2х секунд для обезвреживания диоксинов;
- 4) теоретическую температуру горения газов в камере дожига – чтобы определить необходимые параметры вентилятора;
- 5) геометрические размеры камеры дожига – чтобы поступивший газ успел пройти этап обезвреживания

### **Преимущества установки быстрого пиролиза Г-1,5**

- Данная установка способна самостоятельно поддерживать процесс пиролиза (без использования внешних источников энергии) и отличается высокой производительностью
- В ней обезвреживаются опасные отходы без выделения диоксинов (т.к. газ подвергается воздействию высоких температур) и с небольшим количеством золы (в отличие от сжигания)
- Причем ее применение возможно без предварительной сортировки. Таким образом данная установка становится отличным решением для переработки тех видов пластика, которые не были использованы в качестве вторсырья.
- А на выходе можно получить пиролизный газ и жидкий продукт, или использовать полученную энергию в качестве источника тепла



## 2.5 Преимущества перед мусоросжиганием и причины нераспространенности пиролизных установок

Главным преимуществом является отсутствие выброса диоксинов по причине отсутствия условий для их образования. Т.к. диоксины образуются в присутствии кислорода (атомы кислорода выступают в роли «соединителей» бензольных колец), а процесс пиролиза происходит без доступа кислорода – данные канцерогенные вещества не образуются. В том случае, если в небольшом количестве кислород все-таки попал в камеру вместе с отходами, в присутствии хлора водород образует с ним устойчивые соединения, т.к. хлор является более активным химическим элементом, чем кислород. Кроме того, для обезвреживания вредных веществ в установке предусмотрена камера дожига с температурой около 1200 °С, циклон для удаления механических частиц и нейтрализатор кислых газов.

Конечным продуктом является не просто тепло, как от сжигания мусора, а жидкий продукт и пиролизный газ, которые можно рассматривать как источник тепла в аккумулированном состоянии.

Почему же до сих пор строят МСЗ, а не пиролизные установки, раз они так хороши? Дело в том, что прошлый опыт в использовании пиролизных установок оказывался не очень удачным из-за трудностей в технологическом процессе – в результате разложения кокс образовывал «корку», препятствующую прохождению процессов во внутренних слоях сырья. Такой «пирог» мог несколько суток безрезультатно находиться в печи.

Исследуемая установка спроектирована таким образом, что толстого слоя кокса не образуется, вместо этого образуется тонкая пленка, которая легко подвергается процессам разложения и выходу легких фракций.

Использование пиролизных установок является наилучшим решением для того пластика, который вместо переработки попал на полигон и не может быть переработан во вторичный продукт из-за непригодного состояния.

### Раздел 3. Расчётная часть

Горение - физико-химический процесс, представляющий собой окислительно-восстановительную реакцию между горючим веществом и окислителем, сопровождающийся выделением тепла и излучением света. Для горения необходимо наличие трёх составляющих: горючего вещества; окислителя (кислород воздуха, озон, перекись водорода, галогены, перманганат калия, хромовый ангидрид и т. д.) и благоприятствующего фактора (источник зажигания; физико-химический или биологический процесс, протекающий с выделением тепла, нагретая поверхность).

С точки зрения электронной теории, горение – это перераспределение валентных электронов между горючим веществом и окислителем. Горючее вещество в результате реакции окисления отдает свои валентные электроны, тем самым окисляется. А окислитель присоединяет эти электроны и восстанавливается. Для того, чтобы образовались новые связи, необходимо разорвать старые, а для этого нужна определенная энергия, которая называется энергией активации. Источником этой энергии является тепловое движение атомов. Чем выше температура, тем выше доля активных молекул, тем эффективнее соударения и больше их число. [13]

#### Исходные данные для расчета

Вид топлива: горючий газ сложного состава

Условная химическая формула смеси пиролизных газов:  $C_{7,45} H_{8,41} O_{0,14}$ .

Условная молекулярная масса: 100 кг/кмоль.

Массовая доля углерода: 0,89413.

Массовая доля водорода: 0,084057.

Массовая доля кислорода: 0,021787.

Начальная температура горючего газа – 600 °С

Массовый расход газа - 0,03 кг/с (100кг/час)

### 3.1 Вычисление необходимого количество воздуха для горения в газификаторе

Методика расчёта объёма воздуха для горения зависит от состава горючего вещества, его агрегатного состояния и условий горения. По своей природе горючие вещества могут быть индивидуальными химическими соединениями и смесями сложных химических соединений. К индивидуальным химическим соединениям относятся такие вещества, которые имеют постоянное химическое строение и постоянную химическую формулу, например бензол (С<sub>6</sub>Н<sub>6</sub>), пропанол (С<sub>3</sub>Н<sub>7</sub>ОН), уксусная кислота (СН<sub>3</sub>СООН) и др. Смеси сложных химических соединений – вещества, не имеющие определённого химического строения, и их состав одной химической формулой выразить нельзя. К этой группе веществ относятся уголь, нефть, древесина, жиры и др. Состав этих веществ выражается в процентном содержании отдельных элементов или газов (С, S, Н, и др. или СО, СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>S и др.). [13]

Исследуемое в данной работе вещество относится к смеси сложных химических соединений, поэтому в дальнейшем будут использованы формулы для веществ сложного состава в конденсированном состоянии:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = 0,269 * \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right) \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

Где: С, Н, S, О – весовое содержание соответствующих элементов в составе горючего вещества, % масс

Формула (1) позволяет вычислить, сколько кубометров воздуха теоретически необходимо для сжигания 1 кг продукта.

Различают объём воздуха теоретически необходимый для горения ( $V_{\text{в}}^{\text{теор}}$ ) и объём воздуха действительно (практически) израсходованный на горение ( $V_{\text{в}}^{\text{действ}}$ ). При этом:

$$V_{\text{в}}^{\text{действ}} = \alpha * V_{\text{в}}^{\text{теор}} \quad (2)$$

Где:  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха.

Коэффициент избытка воздуха показывает, во сколько раз объём воздуха, поступивший на горение, больше теоретического объёма воздуха, необходимого для полного сгорания единицы количества вещества в

стехиометрической смеси. Разность между действительным и теоретически необходимым количеством воздуха называется избытком воздуха ( $\Delta V$ )

$$\Delta V = V_{\text{В}}^{\text{действ}} - V_{\text{В}}^{\text{теор}} \quad (3)$$

В исследуемом случае коэффициент избытка воздуха равен 0,3, таким образом действительный объем воздуха будет меньше теоретического и значение избытка воздуха будет отрицательным. То есть реакция будет происходить не с избытком, а с недостатком воздуха.

Объём продуктов горения, образовавшихся при сжигании единицы горючего (1 кг, 1 м<sup>3</sup>, 1 кмоль) в теоретическом количестве воздуха, равен сумме объёмов углекислого газа, паров воды и азота:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^{\text{теор}} \quad (4)$$

Полный, действительный объём продуктов горения находится с учётом избытка воздуха:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{действ}} = V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} + \Delta V = V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} + (\alpha - 1) * V_{\text{В}}^{\text{теор}} \quad (5)$$

Рассчитаем теоретический объем воздуха по формуле (1):

$$V_{\text{В}}^{\text{теор}} = 0,269 * \left( \frac{89,4}{3} + 8,4 + \frac{0 - 2,18}{8} \right) = 10,2 \text{ м}^3/\text{кг}$$

И действительный по формуле (2):

$$V_{\text{В}}^{\text{действ}} = 0,3 * 10,2 = 3,06 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Таким образом, для разложения 1 кг отходов из пластика в пиролизной камере необходимо подавать в газификатор 3,06 м<sup>3</sup> воздуха.

Чтобы сжечь 100 кг отходов за час, необходимо подавать  $100 * 3,06 = 306$  м<sup>3</sup>/час или 0,085 м<sup>3</sup>/с

### 3.2 Вычисление необходимого количество воздуха для горения в камере дожига

На следующем этапе газ поступает в камеру дожига, где коэффициент избытка воздуха равен 1. Т.к. 0,3 части воздуха уже было подано, остается:

$$1 - 0,3 = 0,7 \text{ (коэффициент избытка воздуха)}$$

Т.к. в предыдущем пункте было выяснено, что теоретический объем воздуха равен  $10,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ , то и действительный объем воздуха будет равен по формуле (2):

$$V_{\text{В действ}} = 0,7 * 10,2 = 7,14 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Таким образом, в камеру дожига необходимо подавать воздух из расчета  $7,14 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ кг}$  продукта.

### 3.3 Вычисление объема продуктов горения

Чтобы производить расчет геометрических параметров камеры дожига, сначала необходимо выяснить, какое количество газа должно быть там обработано.

Формула для определения теоретического объема продуктов горения вещества сложного состава в конденсированном состоянии:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = 1,86 * \frac{C}{100} + \left( 11,2 * \frac{H}{100} + 1,24 * \frac{W}{100} \right) + 0,7 * \frac{S}{100} + \frac{1}{100} \left[ 7C + 21 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] \quad (7)$$

Откуда:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = 1,86 * \frac{89,4}{100} + \left( 11,2 * \frac{8,4}{100} + 1,24 * \frac{0}{100} \right) + 0,7 * \frac{0}{100} + \frac{1}{100} \left[ 89,4 + 21 \left( 8,4 - \frac{2,18}{8} \right) + 2,63 * 0 + 0,8 * 0 \right] = 5,2 \text{ м}^3$$

Приведенный выше результат является справедливым для нормальных условий, но т.к. в камере дожига температура составляет около 1200 °С, то для вычисления объема продуктов горения используется уравнение идеальных газов:

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1} \quad (6)$$

Где:

$p_0, V_0, T_0$  – давление (Па), объем ( $\text{м}^3$ ) и температура (К) при нормальных условиях;

$p_1, V_1, T_1$  – давление, объем и температура при заданных условиях.

По формуле (6) объем продуктов сгорания из 1 кг горючего материала при температуре 1200 °С будет равен:

$$x = \frac{5,2 * 1473}{293} = 26,14 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

### 3.4 Расчет геометрических размеров камеры дожига

Чтобы сжечь 100 кг пиролизных газов в камере дожига за час, необходимо подавать  $100 \cdot 7,14 = 714 \text{ м}^3/\text{час}$  или  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$  воздуха.

Как было выяснено, при сжигании 100 кг отходов за час будет образовываться  $2614 \text{ м}^3/\text{час}$  или  $0,73 \text{ м}^3/\text{с}$  продуктов горения.

Для обезвреживания диоксинов необходима выдержка  $t = 2$  секунды, необходимый объем будет равен:

$$V = t * v = 0,73 * 2 = 1,46 \text{ м}^3$$

Объем камеры дожига так же соответствует формуле:

$$V = \pi r^2 * h \quad (8)$$

Где

$r$  – радиус камеры горения

$h$  – длина камеры

Из формулы 8 можно вычислить длину камеры при заданном диаметре  $d = 0,75 \text{ м}$  ( $r = 0,375 \text{ м}$ ):

$$h = \frac{V}{\pi r^2} = \frac{1,46}{0,44} = 3,3 \text{ м}$$

### 3.5 Тепловой баланс процесса горения. Расчёт температуры горения

Под температурой горения понимают максимальную температуру, до которой нагреваются продукты горения.

Теоретическая температура горения – это температура, при которой выделившаяся теплота горения смеси стехиометрического состава расходуется на нагрев и диссоциацию продуктов горения. Практически диссоциация продуктов горения начинается при температуре выше 2 000 К.

Действительная температура горения – это температура горения, достигаемая в условиях реального пожара. Она намного ниже теоретической, калориметрической и адиабатической, т.к. в реальных условиях до 40 % теплоты горения обычно теряется на излучение, недожог, нагрев избытка воздуха и т.д.

Если горючее является сложным веществом и его элементный состав задан в массовых процентах, то для расчёта теплоты сгорания используют формулу Менделеева:

$$Q_H = 339,4 * C + 1257 * H - 108,9(O + N - S) - 25(9 * H + W) \quad (9)$$

где C, H, O, N, S – процентное содержание данного элемента в горючем веществе;

W – содержание влаги в масс. %.

$$\begin{aligned} Q_H &= 339,4 * 89,413 + 1257 * 8,4057 - 108,9(2,1787) - 25(9 * 8,4057) \\ &= 38748,43 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

Для расчёта температуры горения составим уравнение теплового баланса, считая, что выделившееся в результате сгорания тепло нагревает продукты горения от начальной температуры  $T_0$  (по исходным данным начальная температура равна  $600^\circ\text{C} = 873\text{K}$ ) до температуры  $T_g$ :

$$Q_H(1 - \eta) = \sum c_{p\Pi i} * V_{\Pi i}(T_g - T_0) \quad (10)$$

Где

$\eta$  - коэффициент теплопотерь (доля потерь тепла на излучение, а также в результате неполноты сгорания);



$c_{p\Pi i}$  - теплоёмкость  $i$ -го продукта горения при постоянном давлении, кДж/моль\*К;

$V_{\Pi i}$  - объём  $i$ -го продукта горения, м<sup>3</sup>.

Расчёт объёма продуктов горения (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) проводится по следующим формулам:

$$V_{CO_2} = 1,86 * \frac{C}{100} = 1,86 * \frac{89,43}{100} = 1,66 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{H_2O} = 11,2 * \frac{H}{100} + 1,24 * \frac{W}{100} = \frac{11,2 * 8,4057}{100} = 0,94 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$\begin{aligned} V_{N_2} &= \frac{1}{100} \left[ 7C + 21 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,6 * S + 0,8 * N \right] \\ &= \frac{1}{100} \left[ 7 * 89,413 + 21 \left( 8,4057 - \frac{2,1787}{8} \right) \right] = 7,96 \text{ м}^3/\text{кг} \end{aligned}$$

Согласно справочным данным, теплоёмкость имеющихся продуктов горения равна:

$$C_{pCO_2} = 1,86 \text{ кДж/м}^3\text{К} = 4,167 * 10^{-2} \text{ кДж/моль*К};$$

$$C_{pH_2O} = 1,54 \text{ кДж/м}^3\text{К} = 3,45 * 10^{-2} \text{ кДж/моль*К};$$

$$C_{pN_2} = 1,31 \text{ кДж/м}^3\text{К} = 2,93 * 10^{-2} \text{ кДж/моль*К}.$$

Т.к. мы рассчитываем теоретическую температуру, коэффициент теплопотерь примем равным нулю.

Из уравнения теплового баланса:

$$\begin{aligned} T_{\Gamma} &= T_0 + \frac{Q_H(1 - \eta)}{\sum C_{p\Pi i} * V_{\Pi i}} = 873 + \frac{38748,43(1 - 0)}{1,86 * 1,66 + 1,54 * 0,94 + 1,31 * 7,96} \\ &= 3462,65 \text{ К} \end{aligned}$$

Таким образом, теоретическая температура горения газов в камере дожигания равна 3462,65 К

### 3.6 Определение параметров вентилятора

Для обезвреживания газов, вышедших из пиролизной камеры, необходимо на входе в камеру дожига подавать  $714 \text{ м}^3/\text{час}$  ( $0,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ ) воздуха.

Данную потребность может обеспечить один вентилятор марки ВДн-6,3, т.к. его производительность составляет  $5220 \text{ м}^3/\text{ч}$ , полное давление -  $1447 \text{ Па}$ .

Было выяснено, что объем камеры дожига должен составлять  $1,46 \text{ м}^3$ , а теоретическая температура горения газов в камере дожига из п.8.6 равна  $3462,65 \text{ К}$ .

Циклон выдерживает температуру воздуха до  $600^\circ\text{C}$  или  $873\text{К}$ .

Из уравнения идеальных газов (6) видно, что зависимость объема и температуры прямопропорциональна. То есть при уменьшении температуры уменьшается и объем и наоборот, при уменьшении объема уменьшается и температура. Необходимо уменьшить температуру в  $(3465,6/873)$  4 раза ( $1/4=0,25$ ), тогда будем подавать воздух с коэффициентом избытка воздуха  $4*1,25=5$

$0,2*5= 1\text{м}^3/\text{с}$  или  $3600 \text{ м}^3/\text{ч}$  – необходимая производительность вентилятора.

В ходе расчётов были получены следующие данные:

- Для разложения  $1 \text{ кг}$  отходов из пластика в пиролизной камере необходимо подавать в газификатор  $3,06 \text{ м}^3$  воздуха.
- Чтобы сжечь  $100 \text{ кг}$  пиролизных газов в камере дожига за час, необходимо подавать  $714 \text{ м}^3/\text{час}$  или  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$  воздуха.
- При сжигании  $100 \text{ кг}$  отходов за час будет образовываться  $2614 \text{ м}^3/\text{час}$  или  $0,73 \text{ м}^3/\text{с}$  продуктов горения.
- При диаметре  $0,75 \text{ м}$  необходимая длина камеры дожига для сжигания продуктов горения пиролизных газов составляет  $3,3 \text{ м}$ .

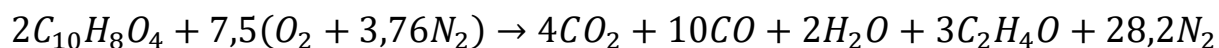
### 3.7 Определение тяжести последствий в результате возгорания пластика на полигоне

#### Расчет продуктов горения

Исследуемая установка перерабатывает отходы из пластика с целью сокращения его количества на полигоне для предотвращения возникновения пожара и выброса вредных веществ. Но что будет, если этот пластик не попадет на переработку, а останется на полигоне и загорится?

Предположим, что на полигоне сгорает 1000кг ПЭТ ( $C_{10}H_8O_4$ )

Составим уравнение реакции горения [13], [15]:



$$n_{ГВ} = 2, \sum n_{ПГ} = 4+10+2+3+28,2 = 47,2$$

Определение теоретического объема продуктов горения:

$$V_{ПГ}^{теор} = \frac{\sum n_{ПГ} * V_t}{n_{ГВ} * M_{ГВ}} = \frac{47,2 * 22,4}{2 * 192} = \frac{1057,28}{384} = 2,75 м^3 / кг$$

Для определения действительного объема продуктов горения по формуле (5) необходимо знать теоретический объем воздуха, затраченный на горение:

$$V_B^{теор} = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) * V_t}{n_{ГВ} * M_{ГВ}} = \frac{(7,5 + 28,2) * 22,4}{2 * 192} = 2,0825 м^3 / кг$$

$$V_B^{действ} = V_B^{теор} * \alpha = 2,0825 * 2 = 4,165 м^3 / кг$$

Т.к. мы рассматриваем случай возгорания на полигоне, то есть в реальных условиях, коэффициент избытка воздуха примем равным отличным от 1 –  $\alpha=2$ , тогда получим по формуле (5):

$$V_{ПГ}^{действ} = V_{ПГ}^{теор} + (\alpha - 1) * V_B^{теор} = 2,75 + 2,0825 = 4,8 м^3$$

Процентный состав продуктов горения рассчитывается исходя из количества молей продуктов горения:

$$\%CO_2 = \frac{n_{CO_2} * 100}{\sum n_{ПГ} + \Delta n_{O_2} + \Delta n_{N_2}} \quad (11)$$

$$\%H_2O = \frac{n_{H_2O} * 100}{\sum n_{\text{пр}} + \Delta n_{O_2} + \Delta n_{N_2}} \quad (12)$$

$$\text{Где: } \Delta n_i = n_i * (\alpha - 1) \quad (13)$$

Теперь на основании формул 11-13 рассчитаем процентный состав продуктов горения, выделившихся в результате сгорания полиэтилентерефталата:

$$\%CO_2 = \frac{4 * 100}{47,2 + 7,5 + 28,2} = \frac{400}{83} = 4,8\%$$

$$\%CO = \frac{10 * 100}{47,2 + 7,5 + 28,2} = 12\%$$

$$\%H_2O = \frac{2 * 100}{47,2 + 7,5 + 28,2} = 2,5\%$$

$$\%C_2H_4O = \frac{3 * 100}{47,2 + 7,5 + 28,2} = 3,6\%$$

Таким образом, при сгорании 1 т ПЭТ будет выделено в окружающую среду  $1000 * 4,8 = 4\ 800 \text{ м}^3$  продуктов горения, среди которых:

$CO_2 - 240 \text{ м}^3$

$CO - 576 \text{ м}^3$

$H_2O - 12 \text{ м}^3$

$C_2H_4O - 173 \text{ м}^3$

**Опасные последствия, к которым может привести выделение полученных продуктов горения:**

### **СО - угарный газ**

Угарный газ, не имеющий цвета, запаха и вкуса, проникает в организм при вдыхании. Поскольку СО связывается с гемоглобином, необходимым для транспортировки кислорода, в 200 раз сильнее, чем кислород, то он через кровь быстро разносится по тканям. Организм больше не получает кислорода в достаточном количестве, и его деятельность нарушается. Наиболее чувствительными в отношении недостатка кислорода являются головной мозг,

нервная система и сердечная мышца. Угарный газ одурманивает или усыпляет свои жертв, и, таким образом, пресекает возможность убежать от возгорания.

Для интоксикации угарным газом достаточно его небольшой концентрации в воздухе – всего лишь 0,1%. Первые признаки интоксикации становятся заметны при воздействии углекислого газа в концентрации всего 0,08% от общего объема воздуха. Человек сразу начинает испытывать затруднения с дыханием и головную боль. Когда CO становится в 4 раза больше, человек теряет способность двигаться и теряет сознание. При этом, если не оказать ему надлежащей медицинской помощи и оставить в тех же условиях, смерть наступит уже через полчаса.

1,2% - критическая отметка содержания CO в воздухе, когда сознание отключается мгновенно, а летальный исход наступает менее чем за 3 минуты.

ПДК макс.разов. – 5 мг/м<sup>3</sup>; ПДКсреднесут. – 3 мг/ м<sup>3</sup>

### **CO<sub>2</sub> – углекислый газ**

Сам по себе углекислый газ не вреден для окружающей среды. Наоборот, он является одним из главных элементов процесса жизнедеятельности растений. Они поглощают CO<sub>2</sub>, перерабатывают его и выделяют в атмосферу кислород. Но если диоксида углерода становится слишком много, он начинает играть роль тепловой изоляции для планеты. Излучение Солнца свободно проходит через атмосферу, но вот обратно, в космос, уходит тем меньше тепловой энергии, чем больше парниковых газов в газовой оболочке Земли. Поверхность планеты начинает нагреваться. Тают льды, изменяются климат и видовой состав флоры и фауны.

Средний уровень CO<sub>2</sub> на нашей планете в настоящий момент составляет около 400 PPM (Parts per million - частей на миллион, или 0,04%) и постоянно растет вследствие постоянного роста потребления нефтепродуктов.

Концентрация в 800ppm уже считается небезопасной, а при 1000ppm, то есть 0,1% объемной концентрации, возникают первые признаки «отравления» (беспричинная вялость, затрудненное дыхание). Однако и эти значения все еще входят в норму: превышением по санитарным нормативам считается уровень выше 1400ppm. При таких показателях уже трудно

концентрироваться на выполнении заданий, если человек на работе, и трудно нормально засыпать, если речь идет об отдыхе дома.

Критические величины – более 3000ppm (0,3%). В этом случае быстро развиваются признаки кислородного голодания, тошнит, учащается пульс.

Индийские ученые из Калькутты определили, что CO<sub>2</sub> – опасный токсин, в повышенной концентрации приводящий к биохимическим изменениям вплоть до клеточных мембран, а также провоцирующий ацидоз.

ПДК макс.разов - 27000 мг/м<sup>3</sup>, ПДКсреднесут. – 9000 мг/ м<sup>3</sup>.

### **СН<sub>3</sub>СНО – ацетальдегид**

Ацетальдегид (уксусный альдегид, этаналь, метилформальдегид) — один из наиболее опасных альдегидов, широко встречающихся в природе и производящихся в больших количествах промышленным способом. При комнатной температуре представляет собой газ с резким фруктовым запахом, который хорошо растворяется в воде, спирте, эфире, при более низких температурах — жидкость с температурой кипения 20,2 °С.

Международное агентство по изучению рака ВОЗ в 2009 году включило ацетальдегид в группу 1 (с доказанным действием) канцерогенов для человека в качестве главного метаболита алкоголя и в группу 2В по общей оценке (с доказанной канцерогенностью для животных). Минимальная безопасная концентрация не установлена. Вещество рассматривают как главный фактор, вызывающий рак ротовой полости и пищевода.

В экспериментах на животных доказано, что ацетальдегид может приводить к нарушению эмбрионального развития.

ПДК – 0,01 мг/м<sup>3</sup>

### 3.8 Расчёт концентраций вредных веществ

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $C_M$  (мг/м<sup>3</sup>) при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем определяется по формуле

$$C_M = \frac{AMFm\mu}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}} \quad (13)$$

где

$A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;

$M$  (г/с) – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;  $m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;

$H$  (м) – высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается  $H=2$  м);

$\mu$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\mu=1$ ;

$\Delta T$  (°C) – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_1$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b$  ( $533-293=240$ );

$V_1$  – расход газовой смеси (м<sup>3</sup>/с), определяемый по формуле:

$$V_1 = \frac{\pi D^2 \omega_0}{4} \quad (14)$$

Откуда

$$\omega_0 = \frac{4V_1}{\pi D^2} \quad (15)$$

где  $D$  (м) – диаметр устья источника выброса;

$\omega_0$  (м/с) – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса.

Значение коэффициента  $A$ , соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна, принимается равным 160 для Европейской территории России, в частности для Поволжского региона.

Значение безразмерного коэффициента  $F$  принимается:

а) для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей (пыли, золы и т.п., скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю)-1;

Значения коэффициентов  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от параметров  $f$ ,  $v_m$ :

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T} \quad (16)$$

$$v_m = 0,65 \sqrt{V_1 \Delta T / H} \quad (17)$$

Коэффициент  $m$  определяется в зависимости от  $f$  по формуле:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,4\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}}, \text{ при } f < 100 \quad (18)$$

$n = 1$ , при  $v_m \geq 2$ ;

Расход газовой смеси ( $V_1$ ) вычислим, основываясь на расчётах п.9.1 по определению необходимого количества воздуха. [14]

На сжигание 1 кг ПЭТ необходимо  $4,165 \text{ м}^3$  воздуха.

На 100 кг –  $416,5 \text{ м}^3$

Предположим, что 100 кг пластика сгорит за 30 минут, тогда расход воздуха составит:

$$V_1 = \frac{416,5}{1800} = 0,23 \text{ м}^3/\text{с}$$

Рассчитаем гипотетический размер очага и вычислим отсюда диаметр.

Экспериментально установлено, что масса одной ПЭТ бутылки = 20 гр, при размерах  $h = 19 \text{ см}$   $r = 3 \text{ см}$

Вычислим объем как сумма объемов цилиндра и конуса, разделив высоту пополам:

$$\begin{aligned} V &= \pi r^2 \frac{h}{2} + \frac{1}{3} \pi r^2 \frac{h}{2} = \pi r^2 \frac{h}{2} \left( 1 + \frac{1}{3} \right) = 3,14 * 9 * 10^{-4} * 0,1 * 1,33 \\ &= 375 * 10^{-6} \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Тогда плотность будет равна:



$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{20 * 10^{-3}}{376 * 10^{-6}} = 53 \text{ кг/м}^3$$

Тогда 1000 кг бутылок будет занимать объем:  $1000/53 = 19 \text{ м}^3$

Предположим, что очаг представляет из себя цилиндр высотой 1 м, тогда его радиус можно вычислить из формулы объема цилиндра:

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi h}} = \sqrt{\frac{19}{\pi * 1}} = 4,5 \text{ м}$$

Тогда диаметр (D) равен  $4,5 * 2 = 9 \text{ м}$

Теперь по формуле (15) можно вычислить  $\omega_0$

$$\omega_0 = \frac{4 * 0,23}{\pi 9^2} = 0,0036 \text{ м/с}$$

По формулам (16-18) вычислим коэффициенты:

$$f = 1000 \frac{0,000013 * 9}{4 * 240} = 0,00012$$

$$v_m = 0,65 \sqrt{0,23 * 240/2} = 3,14$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,4 \sqrt{0,00012} + 0,34^3 \sqrt{0,00012}} = 1,45$$

Для вычисления параметра  $M$  обратимся к значениям, полученным в п.9.1.

Было выяснено, что из исследуемых продуктов горения больше всего содержится угарного газа (СО) – 12%, поэтому проведем расчёт для него:

Для удобства будем производить расчёт исходя из данных о сгорании 100 кг за 30 минут.

Уже известно, что из 1 кг горючего вещества выделится  $4,8 \text{ м}^3$  продуктов горения

Соответственно, из 100 кг -  $480 \text{ м}^3$

Из которых 12% СО –  $57,6 \text{ м}^3$  (или 576 из 4800)

Плотность угарного газа при нормальных условиях  $\rho_1 = 1,98 \text{ кг/ м}^3$

Для вычисления плотности при температуре горения ПЭТ (533К) воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

Учитывая, что  $m = \rho V$ , получим:

$$pV = \frac{\rho V}{M}RT$$

Давление остается постоянным при нормальных условиях, объем сократится, изменится лишь температура и плотность в зависимости от температуры, тогда получим следующее уравнение:

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2, \text{ откуда } \rho_2 = \frac{\rho_1 T_1}{T_2}$$

$$\rho_2 = \frac{1,98 * 293}{533} = 1,08$$

Следовательно, масса CO при возгорании из 57,6 м<sup>3</sup> составит:

$$\rho_2 * V = 1,08 * 576 = 622 \text{ кг}$$

И теперь можно вычислить искомую M:

$$M = \frac{622 * 10^3}{30 * 60} = 345,6 \text{ г/с}$$

Итак, подставив полученные значения в формулу (13) получим:

$$C_M = \frac{160 * 345,6 * 1 * 1 * 1}{2^2 \sqrt[3]{0,23 * 240}} = \frac{5529,6}{15,23} = 3630,7 \text{ мг/м}^3$$

### Определение концентрации CO на расстоянии СЗЗ

Расстояние  $X_M$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $c$  (мг/м<sup>3</sup>) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $C_M$ , определяется по формуле:

$$X_m = dH = 12,168 * 2 = 24,33$$

$$d = 7\sqrt{v_m}(1 + 0,28\sqrt[3]{f}) = 12 * 1,014 = 12,168$$

Определение приземных концентраций  $C_x$  на расстоянии  $x$  метров от источника:

$$C_x = S_1 C_M$$
$$X = \frac{x}{X_m} = \frac{500}{24,3} = 20,57$$

Где  $x$  – расстояние от источника вредных выбросов. Примем значение согласно СЗЗ равное 500м

$$S_1 = \frac{X}{3,58x^2 - 35,2X + 120} = \frac{20,57}{910} = 0,02$$

Тогда концентрация СО на расстоянии 500м будет равна

$$C_{500} = 3630 * 0,02 = 72,6 \text{ мг/м}^3$$

Учитывая, что ПДК макс.разов. – 5 мг/м<sup>3</sup>, в санитарно-защитной зоне ПДК угарного газа будет превышена в 14,5 раз.

## Заключение

В ходе данной работы было выяснено, каким образом внедрение установки быстрого пиролиза Г-1,5 способно снизить риск возникновения ЧС на полигонах ТБО – данная установка позволяет сократить количество пластика, поступающего на полигон, тем самым сокращая масштабы возможных пожаров (т.к. пластик является горючим веществом и способствует распространению пожара) и количество вредных выбросов, т.к. в состав полимерных материалов входит большое количество ядовитых канцерогенных веществ. Наибольшую опасность представляют следующие:

- угарный газ, (который образуется в качестве продукта неполного сгорания углерода из органических веществ) попадая в кровь блокирует способность гемоглобина разносить по организму кислород, в результате чего человек может погибнуть. Признаки отравления угарным газом: головная боль, головокружение, шум в ушах, одышка, мерцание перед глазами, тошнота, общая слабость. Первая помощь – надеть кислород, а затем дать кислородную подушку.

- хлор - выделяется при сгорании ПВХ. Оказывает раздражающее действие на дыхательные пути, отравление хлором может привести к отеку легких. Симптомы отравления: жжение, покраснение и отек век, слизистой оболочки ротовой полости и дыхательных путей; как следствие кашель, одышка, посинение, отек легких. Первая помощь: промывание глаз, носа, рта 2% раствором пищевой соды; закапывание в глаза вазелинового или оливкового масла, а при болях в глазах - по 2-3 капли 0,5% раствора дикаина; наложение глазной мази для профилактики инфекции или по 2-3 капли 30% альбуцида; введение гидрокортизона 125 мг в/м, преднизолона 60 мг в/в или в/м.

В ходе изучения нормативно-правовой базы было определено, что размер санитарно-защитной зоны составляет всего 500м, то есть в случае распространения больших объемов ядовитых веществ в результате пожара сильно пострадают люди, что может послужить поводом для введения режима ЧС.

Анализ существующих методов обращения с ТБО показал, что пиролиз является наиболее эффективным и перспективным методом, особенно для тех видов пластика, получать вторичные ресурсы из которых проблематично.

Преимущества пиролиза заключаются в том, что данный метод позволяет безопасно для окружающей среды утилизировать пластик, сокращая его объемы и превращая в полезный продукт. А исследуемая в настоящей работе установка быстрого пиролиза Г-1,5 отличается от остальных в первую очередь высокой производительностью (500 кг/час).

В результате проведенных расчетов были получены необходимые данные по количеству воздуха для поддержания работы пиролизной камеры и камеры дожигания, объем продуктов горения для определения геометрических размеров камеры дожигания, подобран подходящий вентилятор.

Во второй части расчетов приведен пример ситуации, в случае которой пластик сгорит на полигоне, а не в пиролизной установке. Было получено значение превышения максимальной разовой ПДК угарного газа в санитарно-защитной зоне в 14,5 раз. Что еще раз подтверждает возможность снижения риска возникновения ЧС путем применения пиролизной установки.

## Conclusion

In the course of this work, it was found out how the introduction of the G-1.5 rapid pyrolysis unit can reduce the risk of emergencies at landfills-this unit reduces the amount of plastic entering the landfill, thereby reducing the scale of possible fires (since plastic is a flammable substance and contributes to the spread of fire) and the amount of harmful emissions, since polymer materials contain a large number of toxic carcinogenic substances. The most dangerous are the following:

Carbon monoxide (which is formed as a product of incomplete combustion of carbon from organic substances) entering the blood blocks the ability of hemoglobin to carry oxygen through the body, as a result of which a person can die. Signs of carbon monoxide poisoning: headache, dizziness, tinnitus, shortness of breath, blinking in front of the eyes, nausea, general weakness. First aid is to put on oxygen and then give an oxygen pad.

Chlorine-is released during the combustion of PVC. It has an irritating effect on the respiratory tract, chlorine poisoning can lead to pulmonary edema. Symptoms of poisoning: burning, redness and swelling of the eyelids, oral mucosa and respiratory tract; as a result, cough, shortness of breath, blueness, pulmonary edema. First aid: washing the eyes, nose, mouth with a 2% solution of baking soda; instilling vaseline or olive oil in the eyes, and with pain in the eyes - 2-3 drops of 0.5% dicaine solution; applying eye ointment to prevent infection or 2-3 drops of 30% albucide; administration of hydrocortisone 125 mg i/m, prednisone 60 mg i/v or I/m.

During the study of the regulatory framework, it was found out that the size of the sanitary protection zone is only 500m, that is, in the case of the spread of large volumes of toxic substances as a result of a fire, people will suffer greatly, which can serve as a reason for the introduction of an emergency regime.

Analysis of existing methods of solid waste management has shown that pyrolysis is the most effective and promising method, especially for those types of plastic, which is problematic to obtain secondary resources from. The advantages of pyrolysis are that this method allows you to safely dispose of plastic for the environment, reducing its volume and turning it into a useful product. And the G-1.5 rapid pyrolysis plant investigated in this work differs from the others primarily by its high productivity (500 kg / hour).

As a result of the calculations, the necessary data were obtained on the amount of air to maintain the operation of the pyrolysis chamber and the afterburner chamber, the volume of combustion products to determine the geometric dimensions of the afterburner chamber, and a suitable fan was gorenje.

The second part of the calculations shows an example of a situation in which plastic will burn at a landfill, and not in a pyrolysis plant. The value of exceeding the maximum single MPC of carbon monoxide in the sanitary protection zone by 14.5 times was obtained. This once again confirms the possibility of reducing the risk of an emergency by using a pyrolysis plant.

## Список использованных источников и литературы

1. Федеральный закон № 68-ФЗ от 21 декабря 1994 года «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»
2. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 07.04.2020) "Об отходах производства и потребления"
3. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 27.12.2018) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"
4. Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 N 52-ФЗ
5. СанПиН 2.1.7.722-98 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов.
6. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов" (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 25 сентября 2007 г. N 74)
7. Проблемы в области обращения с промышленными отходами и пути их решения - И.К. Итышев, С.О. Потапова
8. Журнал «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» о проблемах пожарной безопасности твердых бытовых отходов и мест их хранения - И.К. Итышев, С.О. Потапова. С 292 – 300
9. ГОСТ 12.1.033–81 «ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения».
10. Систер В.Г. [и др.]. Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание)
11. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 29.12.2010) «Об охране окружающей среды».
12. Т.Н. Мухина Н.Л. Барабанов С.Е. Бабаш. Пиролиз углеводородного сырья
13. Основы процессов горения. Материальный и тепловой баланс процессов горения. О. В. Беззапонная, Е. В. Вайнтер
14. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий
15. Термическое разложение органических полимеров С. Мадорский



- 16.ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
- 17.«Положение о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании», утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 24 июля 2000 г № 554
- 18.Повышение экологической безопасности полигонов и свалок твердых бытовых отходов - А.М. Шаимова, Л.А. Насырова, Г.Г. Ягафарова Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа
- 19.СанПиН 42-128-4690-88. Санитарные правила содержания территорий населенных мест (утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 05.08.1988 № 4690-88).
20. Бобович Б.Б. Переработка промышленных отходов: учебн. для вузов. — М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1999. — 445 с.
- 21.Середа Т.Г. [и др.]. Снижение пожаровзрывоопасности объектов депонирования отходов / Т.Г.Середа, О.В. Кушнарера, С.Н. Костарев, А.И.Устинов, М.А. Михайлова // Пожарная безопасность. 2008 № 3 С. 84-89.  
"Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов" (утв. Минстроем России 02.11.1996)