

Техносферная безопасность, нормирование плазменной газификации нефтесодержащих отходов: термодинамический и эксергетический анализ

М.К. Нуфман¹, Е.В. Нафикова², А.Н. Елизариев², В.Е. Мессерле^{1,3}, А.Б. Устименко^{1,3},
О.А. Лаврищев¹, И.И. Ахияров², З.А. Мансуров^{1,3}, К.А. Умбеткалиев^{1,3*},
С.К. Танирбергенова³, Н.К. Жылыбаева³, Д.А. Тугелбаева³

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

²ФГБОУ ВО Уфимский государственный университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, Уфа, Россия

³Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

ARTICLE INFO

Получено
17.12.2025

Получено в исправленном
виде
13.01.2026

Принято
18.03.2026

Ключевые слова:

плазменная газификация;
плазменный реактор;
нефтесодержащие
отходы; нефтешлам;
стандартизация;
термодинамика;
эксергия; техносферная
безопасность

АННОТАЦИЯ

Аккумуляция нефтесодержащих отходов (НСО) представляет собой одну из наиболее острых экологических проблем, которая приводит к нарушению биологического разнообразия, дисбалансу биоценозов и изменению химических и структурных показателей почвы, что ухудшает естественную регенерацию и аэрируемость, а также вызывает деградацию флоры и фауны. Важной задачей для научного сообщества является разработка эффективных методов утилизации НСО с акцентом на быструю реализацию и концепцию устойчивого развития. Одним из перспективных подходов является плазменная газификация НСО – технология, основанная на использовании плазмы для разложения и утилизации различных видов отходов. По сравнению с традиционными процессами утилизации отходов, их плазменная газификация сопряжена с высоким энергопотреблением и повышенными требованиями к квалификации персонала, эксплуатирующего плазменное оборудование. Внедрение плазменной технологии требует дальнейшего изучения и разработки нормативных регламентов, норм и стандартов в этой области. В статье рассмотрены аспекты техносферной безопасности и нормирования метода плазменной утилизации НСО посредством их газификации, включая вопросы охраны труда и экологической безопасности, а также пути минимизации возможных негативных факторов. Выполнены термодинамический и эксергетический анализ плазменной газификации НСО. Проанализирована международная нормативная документация, регулирующая использование плазменных технологий для утилизации НСО. Разработан алгоритм применения плазменных технологий при переработке НСО. Также апробирована технология плазменной утилизации смешанных НСО «мазутных ям» на территории Республики Башкортостан (Россия). Составлена принципиальная схема реализации процесса утилизации НСО в плазменном реакторе, произведен расчет необходимых устройств для реализации процесса, а также смоделированы термодинамические условия осуществления процесса плазменной газификации НСО с использованием программы TERRA. Представлены рекомендации по стандартизации плазменной утилизации НСО с точки зрения охраны труда и защиты окружающей среды.

1. Введение

С каждым годом количество накопленных нефтесодержащих отходов (НСО) увеличивается, что создает серьезные проблемы для экосистем и здоровья человека [1-3]. Одним из перспективных методов утилизации НСО является плазменная газификация [4-14]. Это технология, основанная на использовании плазмы для разложения и

утилизации различных видов отходов. В современном мире нормирование экологических показателей, экологический мониторинг и надзор сдерживают распространение стихийных свалок НСО за счет инструментов, позволяющих идентифицировать нарушителя экологических норм.

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), мировое потребление нефти в 2024 году составляло около 14,2 млн тонн в сутки

*Corresponding author: K.A. Umbetkaliyev; E-mail address: kuanush.umbetkaliyev@kaznu.edu.kz

при ежедневном производстве нефтяных шламов (нефтешламов) около 29000 т [15]. Среди НСО нефтешламы являются самым распространенным видом отходов. Нефтешламы – это сложные физико-химические смеси, которые состоят из нефтепродуктов, механических примесей (глины, оксидов металлов, песка) и воды. НСО образуются в результате производственных процессов: переработки, добычи, транспортировки нефти и нефтяных продуктов, а также в результате естественных контролируемых и неконтролируемых процессов: очистка нефти от примесей и воды, аварийных разливов [15-18]. В последнем случае при позднем обнаружении или масштабной аварии наносится колоссальный ущерб экосистеме [1, 2]. Таким образом, данный вид отходов подлежит переработке, хотя захоронению по-прежнему подвергается большая часть нефтешламов [19-21].

Существуют следующие основные виды технологий переработки НСО:

- механические (в том числе разделение на фазы) [22-27];
- термические (сжигание, в том числе микроволновый нагрев, плазменная газификация и пиролиз) [28-33];
- ультразвуковые [34-36];
- захоронение отходов на полигонах [37];
- физико-химический способ очистки грунта и электрохимическая обработка загрязненных земель [38, 39];
- химические методы [40, 41];
- биорекультивация и биотехнологический способ очистки грунта, в том числе биоремедиация [42-44] и другие методы.

При анализе эффективности плазменной утилизации отходов возник вопрос о безопасности применения данной технологии [45, 46]. Плазменные технологии ведут к сокращению выбросов парниковых газов, обеспечивая значительное экологическое преимущество по сравнению с традиционными методами сжигания [6, 7, 47-49]. Известно, что традиционные методы сжигания НСО приводят к выбросу загрязняющих веществ, таких как диоксины, фураны, полициклические ароматические углеводороды, тяжелые металлы, оксиды азота (NO_x) и оксиды серы (SO_x), которые способствуют загрязнению воздуха и создают опасность для здоровья человека [50, 51]. Отметим, что рекомендуемые температуры разложения токсичных соединений (при их воздействии в течение 2 сек) следующие: фураны – 1053-1273 К; диоксины – 973-1473 К; бенз(а)пирен – 673-1073 К [5]. Таким образом, при времени воздействия 2

сек при температуре 1050 К разлагается 70% токсичных соединений, а при 1173 К – 90%. При плазменной газификации, наряду с получением синтез-газа (H_2 и CO), могут увеличиваться выбросы радикалов OH при одновременном снижении выбросов CO_2 [47-49]. Синтез-газ – «чистое» топливо для выработки электроэнергии, что способствует энергетической устойчивости промышленных объектов [47-49]. При том, что плазменная газификация снижает некоторые выбросы, она все еще требует тщательного контроля со стороны экологического аудита, эколого-промышленной безопасности и нормирования ее использования.

Вопрос плазменной утилизации отходов начал набирать популярность в последние десятилетия, хотя исследования плазмы берут начало еще в 20 веке. К первым коммерциализированным установкам по плазменной переработке отходов можно отнести запатентованную технологию PEM-газификатора (Plasma Enhanced Melter, 2008), а также плазменную установку, разработанную Институтом атомной энергии имени Курчатова на территории Израиля, в городе Кармиэль (2010) [52]. Сегодня установки плазменной переработки отходов успешно применяются во многих странах мира, утилизируя практически все категории твердых отходов [21-27, 45, 53].

Актуальность оценки техносферной безопасности плазменных установок обусловлена несколькими ключевыми факторами:

- расширение области применения плазменных реакторов (энергетическая, нефтеперерабатывающая, металлургическая и химическая отрасли) и требований по оценке их безопасности для предотвращения аварий и инцидентов;
- стандарты и нормативы в области промышленной безопасности ужесточаются, вызывая необходимость изучения и разработки современных требований к плазменной технологии, позволяющие минимизировать риски;
- анализ возможных выбросов и воздействия на экосистему является важным аспектом устойчивого развития и экологической безопасности;
- технический прогресс, несущий новые риски, связанные с эксплуатацией плазменных установок;
- подготовка персонала посредством разработки эффективных программ обучения для работников и стандартов оценки параметров опасных и вредных производственных факторов для создания безопасной рабочей среды;
- экономические последствия аварий на производстве, которые могут привести к значительному финансовому ущербу.

В отличие от существующих работ, данное исследование фокусируется на комплексном подходе, сочетая экспериментальную апробацию, термодинамическое моделирование, эксергетический анализ и разработку рекомендаций по нормированию. В данной статье рассматриваются аспекты техносферной безопасности нормирования плазменной газификации НСО, включая вопросы охраны труда и экологической безопасности, а также возможные пути минимизации негативных эффектов. Техносферная безопасность – это состояние защищенности человека, общества и окружающей среды от негативных последствий техногенной деятельности, обеспечиваемое через интеграцию экологических, социальных и технических аспектов.

Цель данного исследования – разработать научно обоснованные рекомендации по нормированию и апробировать применение плазменной газификации для утилизации НСО. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- анализ международной нормативной документации, регламентирующей использование плазменных технологий;
- разработка алгоритма и принципиальной технологической схемы применения плазменных технологий переработки НСО;
- обоснование технологии плазменной переработки отходов на примере плазменной газификации НСО «мазутных ям» Башкортостана;
- разработка рекомендаций по стандартизации плазменной утилизации НСО с точки зрения охраны труда и защиты окружающей среды.

2. Методы и материалы

2.1. Метод анализа нормативной документации

Анализ нормативно-правовой и нормативно-технической документации проводился на основе действующих документов, представленных в базах данных справочных систем «Техэксперт» Российской Федерации, Российского института стандартизации («Техэксперт», [tech-expert.ru](http://techexpert.ru)), интернет-магазина стандартов Республики Казахстан «КазСтандарт» (new-shop.ksm.kz), а также базы данных ISO (International Organization for Standardization, www.iso.org). С использованием систем управления базами данных проводилась классификация исследуемых документов: разделение собранной документации на группы (законодательные акты, технические регламенты,

стандарты, методические рекомендации и т.д.) и определялась приоритетность документов в зависимости от их значимости для обеспечения техносферной безопасности. Далее проводился анализ содержания: изучались требования к проектированию, эксплуатации и мониторингу установок плазменной переработки отходов, анализировались наилучшие доступные технологии применения плазменных установок, а также мониторинга и контроля процессов термической деструкции НСО. Выявлялись недостатки и противоречия в документации, а также анализировалась реформа регулирования нормативных документов по техносферной безопасности. Установлено, что в настоящее время отсутствуют прямые стандарты, регламентирующие работу плазменных установок для утилизации НСО, а также документы, устанавливающие предельно допустимые нормы, регламенты контроля и мониторинга загрязнения окружающей среды, нормы промышленной безопасности и требования по охране труда для этих технологий. Процессы и технологии плазменной переработки НСО в настоящее время преимущественно находятся на стадии научно-исследовательских разработок и не имеют широкого применения в промышленности, чем обусловлена недостаточно развитая нормативно-техническая документация в данной области. Существующая нормативно-техническая документация отражена рядом документов, косвенно регламентирующих нормы и требования безопасной эксплуатации плазменных установок, а также методы контроля и мониторинга параметров процесса термической деструкции нефтепродуктов [54-63].

В информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям [64] представлены методы, которые могут быть адаптированы для процессов плазменного сжигания НСО, такие как:

1. Контроль температуры плазменной горелки и зоны сжигания;
2. Контроль концентрации вредных веществ в отходящих газах;
3. Контроль содержания золы и шлака в продуктах сжигания;
4. Контроль расхода воздуха и топлива;
5. Контроль давления и влажности в зоне сжигания;
6. Идентификация и анализ факторов производственной среды для обеспечения охраны труда оператора установок термического сжигания.

Таким образом, выявление показателей, которыми будет определяться безопасность применения плазменной технологии при утилизации НСО, их нормы (для недопущения загрязнения окружающей среды и защиты здоровья человека) является основой для разработки нормативных стандартов.

2.2. Объект исследования

В качестве объекта исследования для апробации технологии выбран нефтешлам верхних битуминизированных слоев «мазутных ям», находящихся на территории Республики Башкортостан (Россия). Республика Башкортостан является одним из ключевых регионов России с развитой нефтяной промышленностью, что, к сожалению, приводит к значительным проблемам с НСО. Месторождения нефти, расположенные на территории республики, активно разрабатываются, что неизбежно вызывает образование отходов и загрязнение почвы и водоемов. Нефтяные скважины, трубопроводы и перерабатывающие предприятия создают риски для экосистемы региона, вызывая деградацию природных ресурсов и ухудшая состояние здоровья населения. В связи с этим Республика Башкортостан сталкивается с необходимостью разработки и внедрения эффективных методов утилизации НСО [65].

«Мазутные ямы» представляют собой несколько земляных котлованов (чаще прямоугольной формы), в которые на протяжении нескольких десятилетий складировались НСО, образовавшиеся в результате деятельности предприятий нефтедобычи, нефтепереработки и транспортировки нефтепродуктов. Общая площадь загрязнений

нефтепродуктами исследуемого участка «мазутных ям» составляет 116786 м², средняя площадь «мазутной ямы» – 52 м². «Мазутные ямы» облицованы изнутри слоем глины для избежания сорбции жидкости в грунт и окружены защитным земляным валом для предотвращения растекания жидкости и попадания в водоемы.

Проведена оценка состава исследуемого нефтешлама по стандартизированным методам испытания. Результаты исследования образцов нефтешлама «мазутных ям» сведены в табл. 1. Для термодинамического анализа плазменной переработки нефтешлама определен компонентный состав НСО, приведенный в табл. 2. Перед процессом плазменной переработки пастообразная форма нефтешлама подвергалась подготовке. НСО «мазутных ям» подсушивались и измельчались до фракции не более 0,5 см [12, 14, 66-68].

2.3. Метод плазменной переработки нефтесодержащих отходов

Одним из распространенных методов ликвидации НСО на сегодняшний день – сжигание в газовых вращающихся наклонных печах и захоронение образующейся в ходе процесса золы на специальных полигонах. У данного метода имеются серьезные недостатки: неполнота сгорания НСО и образование токсичных химических соединений, таких как диоксины, фураны, полициклические ароматические углеводороды, тяжелые металлы, оксиды азота (NO_x) и оксиды серы (SO_x) [13]. Авторам в работе [10, 11, 14] выполнены экспериментальные и теоретические исследования, а также апробированы технологии плазменной утилизации НСО, таких как отходы от переработ-

Таблица 1. Физико-химические характеристики образцов нефтешлама из «мазутных ям»

№	Наименование показателя	Метод испытаний	Требования к точности исследования	Результат испытаний
1	Массовая доля нефтепродуктов*, %	ПНД Ф 16.1:2.2.22-98	не нормир.	до 68,9
2	Массовая доля механических примесей, %	ГОСТ 2477	не более 1,0	3,3
3	Массовая доля воды, %	ГОСТ 1437	не более 1,0	25,0
4	Массовая доля серы, %	ГОСТ 3900	не более 3,50	2,0
5	Плотность при 20 °С, кг/м ³	ГОСТ 1461	не нормир.	1098,6
6	Зольность, %	ГОСТ 4333	не более 0,14	4,1
7	Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 20287	не ниже 110	>110
8	Температура застывания, °С	ГОСТ 6258	не выше 25	14
9	Вязкость условная при 100 °С, град. ВУ	ГОСТ 2477	не более 6,8	2,85

Примечание: *В зависимости от слоя нефтешлама.

Таблица 2. Компонентный состав исследуемого нефтешлама «мазутных ям»

Компонентный состав	C	H	O	S	N	H ₂ O	P	K	Ca	Si	Fe
% по массе	41,1	14	11	2,2	3,5	25	0,3	0,26	0,7	0,74	1,2

ки нефти, отработанное масло. Использование плазменных технологий для утилизации отходов в мире имеет коммерческий интерес. Коммерциализированные электродуговые установки для утилизации бытовых отходов работают в США, Японии, Китае, Малайзии [67]. В Великобритании, Европе, Индии данная технология коммерциализацию не прошла и остается на стадии исследования или опытно-промышленного применения [12]. В России был предложен комбинированный метод обеззараживания отходов с использованием плазмохимического реактора на базе АО НПО «Технолог» (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан), который до настоящего времени является опытно-промышленным образцом. Эта установка рассчитана на переработку более 30 видов отходов, в том числе трихлорэтилена, метилхлорида, полихлорбифенилов, НСО, керосина, ацетона, толуола, бензола, отработанных эмульсий, смесей нефтепродуктов, лаков, красок и прочее [48]. В плазмохимическом реакторе отходы смешиваются с горячим воздухом и разлагаются с образованием нетоксичных веществ (диоксид углерода, водяной пар, хлористый водород и азот).

Согласно [49], в России для утилизации нефтесодержащих отходов при сжигании чаще всего используют следующие установки: печь барабанного типа (Печь УУН 0,8), вращающиеся печи (КТО-1000.З.В./КТО-1000.Ш), камерные печи сжигания с системой поддувала (Мусоросжигательная установка СВ 128SW-L), камера сгорания (бочка) (Установка «Форсаж-2М»), инсинераторные установки (ИУ-80), подовые печи (КТО-50.К20.П, КТО-50.К40.П, КТО-50.БМ.П, КТО-Ю0.К40.П, КТО-Ю0.МК, КТО-150.З.П, КТО-150.БМ.П), а также камерные печи (Мобильный инсинератор «Hurikan150»). Для низкотемпературного пиролиза нефтяных шламов без доступа кислорода в паровой среде используют реактор (УТД-2) [53]. Плазменная утилизация или плазменная газификация позволяет разлагать сложные полимеры до газообразных углеводородов и оксида углерода. По сути, здесь также используется принцип обработки массы отходов высокими температурами (термическая переработка), однако объект доводится не до разложения (как это происходит

при пиролизе), а до превращения в газ, так как применяют экстремально высокие температуры не ниже 1200 К. На протяжении всего процесса очень важно поддерживать высокую температуру, чтобы избежать риска образования смол и жидкостей, которые образуются при переработке на более низких температурах. Кроме того, экстремальные температуры позволяют добиться полного распада токсичных и сложно разлагаемых веществ [48-50], которые таким образом безопасно утилизируются. Применение плазменных технологий может разрушить не только углеводородные загрязнители, но и тяжелые металлы, присутствующие в НСО, преобразуя их в безопасные химические соединения, такие как стеклообразные вещества или оксиды.

В данной статье рассмотрена плазменная газификация как метод термической деструкции НСО (нефтешламов «мазутных ям») в небольших плазменных реакторах при температуре выше 1200 К, что позволяет разложить все сложные вещества на простейшие, исключая появление вредных выбросов, а в результате переработки получают высоколиквидное сырье и топливо [48-50]. При этом для повышения эффективности процесса переработки НСО разработана и испытана плазмохимическая технология утилизации, основанная на распылении предварительно нагретых до жидкого состояния НСО и их газификация в продуктах плазменной термохимической подготовки аэросмеси (угольная пыль и воздух) в плазменно-топливной системе (ПТС) [50]. В результате на выходе из ПТС образуется высокорекреакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ и коксовый остаток), являющееся газифицируемым агентом. Для переработки НСО применялась разработанная и апробированная плазменная установка (рис. 1), детально описанная в работе [8].

Плазменная экспериментальная установка состоит из двух основных узлов: ПТС диаметром 0,25 м и длиной 2,35 м, а также реакционной камеры диаметром 0,66 м и длиной 3,5 м [8]. Экспериментальная установка включает систему электропитания плазмотрона 5, системы подготовки и подачи аэросмеси 1-3, плазмообразующего газа

и охлаждающей воды в плазмотрон 8, ПТС 9 и реакционную камеру 14, пульт управления плазмотроном и систему очистки отходящих газов. Газообразные продукты плазменной обработки НСО отбирались на выходе реакционной камеры 14 экспериментальной установки для последующего анализа.

2.4. Технология утилизации нефтесодержащих отходов методом плазменной газификации

Для процесса газификации НСО в экспериментальной установке с использованием ПТС разработана принципиальная технологическая схема (рис. 2).

Представленная технологическая схема процесса (рис. 2) состоит из бункера ОСWSB с НСО I, которые с помощью винтового насоса SP подаются в плазменный реактор-газификатор PG. В плазменном реакторе-газификаторе PG происходит газификация НСО I с помощью газифицирующего агента III, который создается за счет подачи угольной пыли II из бункера угольной пыли CDB вентилятором F к плазмотрону P. Полученный синтез-газ IV поступает дальше на очистку и охлаждение в мокрый скруббер WS, а минеральный остаток V попадает в шлакоосборник AC. В мокром скруббере WS синтез-газ IV охлаждается и очищается от соединений серы при помощи подачи адсорбента за счет центробежной форсунки VI,

очищенный синтез-газ VII идет в производство, отработанный адсорбент VIII – на утилизацию (или очистку). Работа установки при переработке в ПТС НСО «мазутных ям» (рис. 3а) Республики Башкортостан. В ПТС подавалась аэросмесь с расходом 4,6 т/ч (1 т/ч угля и 3,6 т/ч воздуха), которая взаимодействовала с плазменным факелом от плазмотрона P номинальной электрической мощностью 400 кВт. В процессе работы ПТС осуществлялась термохимическая подготовка аэросмеси, в результате которой образовывался факел высокотемпературного двухкомпонентного топлива (горючий газ и коксовый остаток) с температурой 2000 К. Этот факел служил газифицируемым агентом для переработки распыленного НСО в реакционной камере PG. Расход исследуемого НСО составил 2 т/ч, при этом плазмотрон работал на мощности 400 кВт. В результате переработки исследуемого нефтешлама на выходе реакционной камеры был получен синтез-газ с концентрацией 60% (H_2 – 29%, CO – 31%) и теплотой сгорания 10840 кДж/кг. Удельные энергозатраты на процесс плазмохимической переработки исследуемого нефтешлама, включая затраты электроэнергии на омический подогрев реакционной камеры, составили 3,3 кВт·ч/кг НСО, что на 20% ниже по сравнению с традиционной технологией переработки в наклонных вращающихся газовых печах. Кроме синтез-газа на выходе реакционной камеры был собран мелкодисперсный порошок

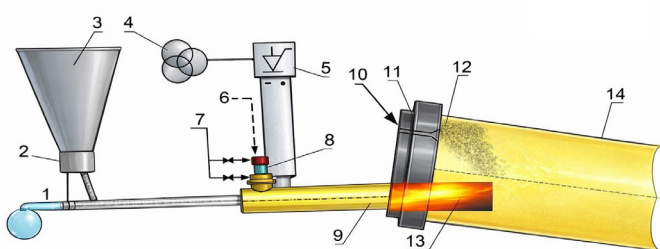


Рис. 1. Схема установки для газификации нефтешлама с использованием ПТС: 1 – вентилятор; 2 – пылепитатель; 3 – бункер угольной пыли; 4 – трансформатор; 5 – источник электропитания плазмотрона; 6 – охлаждающая вода; 7 – плазмообразующий воздух; 8 – плазмотрон; 9 – ПТС; 10 – нагретые нефтешламы; 11 – форсунка для распыления нагретого нефтешлама; 12 – облако распыленных нагретых нефтешламов; 13 – факел высокотемпературного двухкомпонентного топлива; 14 – реакционная камера. Воспроизведено из [8], опубликовано по лицензии CC BY 4.0.

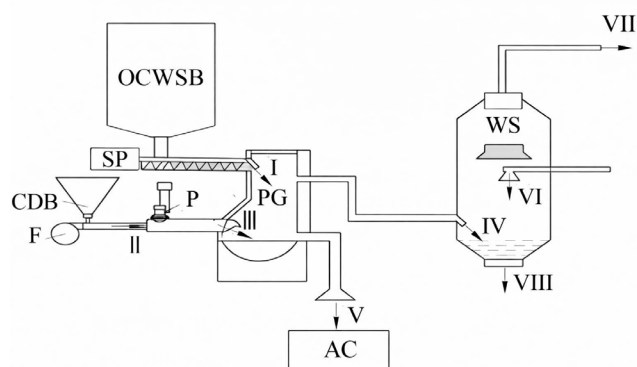


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема процесса плазменной газификации НСО: AC (ash collector) – шлакоосборник; CDB (coal dust bunker) – бункер угольной пыли; F (fan) – вентилятор; OCWSB (oil-contaminated waste storage bunker) – бункер с НСО; P (plasmatron) – плазматрон; PG (plasma gasifier) – плазменный газификатор; SP (screw pump) – шнековый питатель; WS (wet scrubber) – мокрый скруббер; I – нефтезагрязненные отходы; II – угольная пыль; III – газифицирующий агент; IV – синтез-газ; V – зольный остаток; VI – адсорбент; VII – очищенный синтез-газ; VIII – использованный адсорбент.

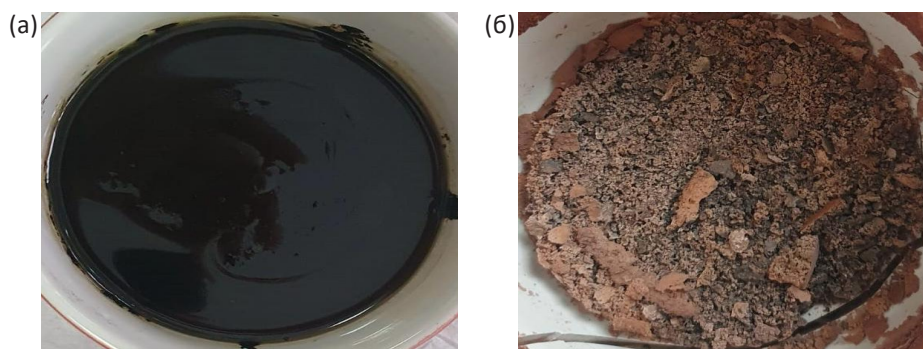


Рис. 3. Внешний вид исследуемого нефтешлама “мазутных ям” Республики Башкортостан (а) и зольного остатка после его газификации (б).

серо-бурого цвета (рис. 3 б), представляющий собой смесь минеральной части исследуемого нефтешлама и угля.

Выполнены расчеты плазменно-воздушной газификации НСО «мазутных ям» верхних слоев с использованием универсальной программы термодинамических расчетов многокомпонентных гетерогенных систем TERRA, отработанной для расчетов высокотемпературных процессов и применяемой для исследования плазменных технологий переработки топлив и отходов [47]. Расчеты проводились в температурном интервале от 700 до 3000 К. Отношение массовых расходов НСО к воздуху составляло 1:1. Результаты расчетов состава газовой и конденсированной фаз и удельных энергозатрат при плазменной газификации НСО представлены на рис. 4-7. На рис. 4 показано изменение концентрации углерода в зависимости от температуры плазменно-воздушной газификации НСО. В интервале температур 700-850 К концентрация углерода повышается за счет разложения углеводородов НСО. С дальнейшим повышением температуры концентрация углерода снижается до 0% при 1150 К. Это соответствует полной газификации углерода с образованием

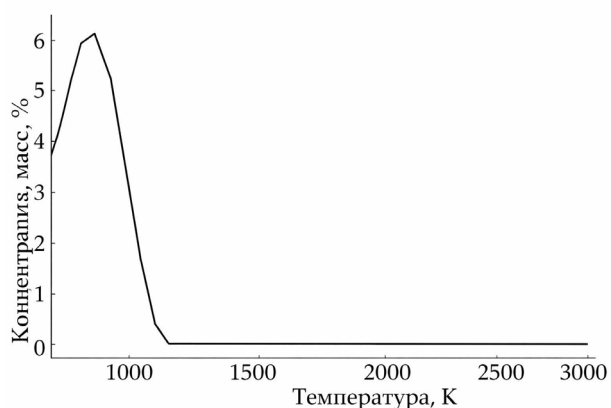


Рис. 4. Зависимость концентрации углерода от температуры процесса плазменной газификации НСО.

СО и подтверждает высокую эффективность процесса. На рис. 5 показана температурная зависимость удельных энергозатрат на процесс газификации НСО. Удельные энергозатраты изменялись от 0,63 до 1,36 кВтч/кг в интервале температур 850-1500 К. В результате плазменно-воздушной газификации НСО получен горючий газ, температурная зависимость состава которого представлена на рис. 6. В результате переработки НСО при температуре 1500 К, обеспечивающей полное разложение фуранов, диоксинов и бенз(а)пирена, получен следующий состав горючего газа, об. %: CO – 22,8; H₂ – 55,9; CO₂ – 0,1; N₂ – 19,7; H₂O – 0,7. Из рисунка видно, что при температуре 1500 К обеспечивается высокая концентрация горючих компонентов при отсутствии вредных побочных продуктов. На рис. 7 представлена температурная зависимость конденсированных компонентов при плазменно-воздушной газификации НСО. Из рисунка следует, что в интервале температур 700-1300 К концентрации трикальцийфосфата (Ca₃P₂O₈), силиката калия (K₃Si₄O₉), кремнезема (SiO₂) и моносиликата кальция (CaSiO₃) практически не меняются и составляют 0,8, 0,6, 0,3 и 0,2%, соответственно. При дальнейшем повышении

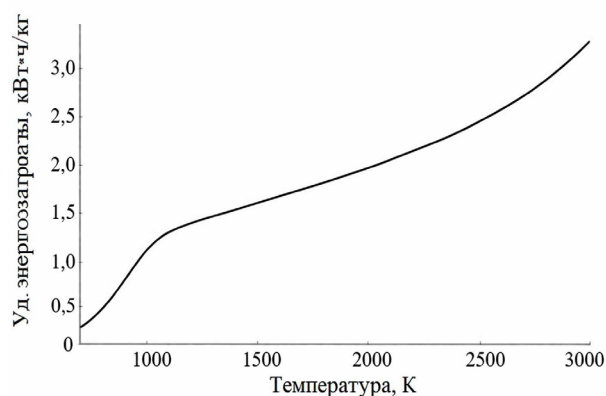


Рис. 5. Удельные энергозатраты в зависимости от температуры плазменной газификации НСО.

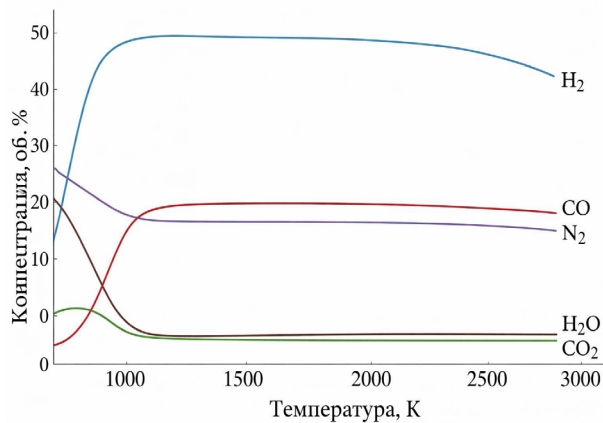


Рис. 6. Концентрация компонентов газовой фазы в зависимости от температуры плазменной газификации HCO.

температуры в конденсированных компонентах доминирует моносилкат кальция с концентрацией 1%. Отметим, что все конденсированные компоненты, образующиеся в процессе плазменно-воздушной газификации HCO, термодинамически устойчивы и инертны по отношению к целевому продукту – синтез-газу и не представляют опасности для окружающей среды.

Представленные результаты термодинамического моделирования однозначно демонстрируют высокую эффективность плазменной газификации HCO. Основными показателями полноты процесса являются резкое снижение концентрации твердого углерода и доминирование концентрации водорода в оптимальном температурном интервале 1150-1500 К. Данные закономерности подтверждают практически полное разложение углеводородов, что является ключевым критерием экологически безопасной плазменной утилизации HCO.

2.5. Эксергетический анализ применения ПТС для переработки HCO

Выполненный эксергетический расчет позволяет охарактеризовать влияние качества энергии и рассчитать энергоэффективность работы плазменного газификатора (рис. 2). Для сравнительного анализа выполнен расчет показателей тепловой эффективности при традиционном сжигании нефтесодержащих отходов, а также с применением ПТС (рис. 1), который можно использовать как коэффициент количественной эффективности. Отличительной особенностью расчета эксергии является то, что данный подход основан на удельном расходе теплоты в комбинированном цикле Карно, известном как эксергетический ана-

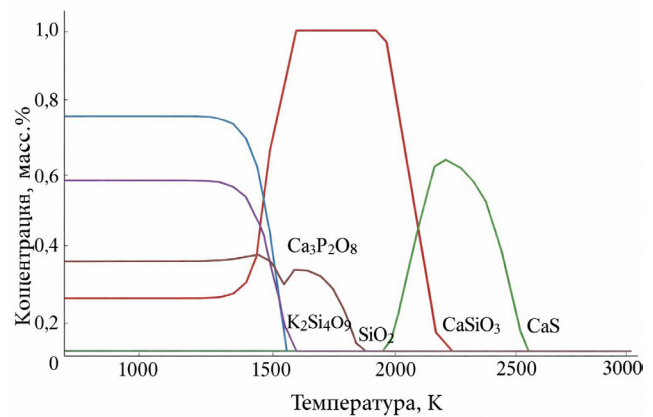


Рис. 7. Концентрация конденсированных компонентов в зависимости от температуры плазменной газификации HCO.

лиз, «ex» является сокращением от «exergy» – эксергия [5]. Термический КПД идеальных циклов комбинированного цикла Карно, рассчитанный с использованием среднетермодинамических температур, определяется по формулам (1)-(6).

Эффективность для исходного комбинированного цикла составляет:

$$\eta_c = 1 - T_0/T^1 = (N + exQ)/Q_h \quad (1)$$

Эффективность для «верхнего» цикла составляет:

$$\eta_h = 1 - T_2/T_1 = N/Q_h \quad (2)$$

$$\bar{q}_p = 1/\eta_c = Q_h/(N + exQ) \quad (3)$$

$$\eta_t = 1 - 2T_0/(T + T_0) \quad (4)$$

$$exQ = \eta_t Q \quad (5)$$

$$\bar{q}_w = (1 - \eta_h)/\eta_c / (1 - \eta_h) = exQ/(N + exQ) / (1 - N/Q_h) = \eta_t \bar{q}_h \quad (6)$$

где: η_t – термический КПД «нижнего» цикла; η_h – термический КПД «верхнего» цикла; η_c – термический КПД «комбинированного» цикла; exQ – эксергия тепла; T_0 – температура окружающей среды при $P_0 = 0,101$ МПа; T – температура сгорания (газификации) биомассы; T_1 – средние термодинамические температуры первого цикла; T_2 – средние термодинамические температуры второго цикла; Q – тепловая мощность БМ (нижний тепловой потенциал); Q_h – высший тепловой потенциал; N – электрическая мощность; \bar{q}_w – пропорциональное потребление тепла высшим циклом для получения работы; \bar{q}_h – это пропорциональное потребление тепла в более высоком цикле для получения тепла [80].

Использование эксергетического анализа позволяет рассчитать качество энергии и КПД отдельных агрегатов. Для сравнения были рассчитаны показатели эффективности традиционного сжигания НСО, а также с использованием их плазменной газификации. В таблице 3 показаны результаты сравнительных расчетов эксергии данных процессов. Как видно из таблицы 3, при плазменной газификации НСО эксергетическая мощность выше на 14%, чем при их сжигании, что подтверждает эффективность использования ПТС для переработки НСО.

Ожидается, что стандартизация минимально допустимых температурных ограничений для оборудования для термической переработки НСО позволит сократить выбросы вредных веществ (диоксинов, фуранов и бенз(а)пирена) и углеродный след. Сравнив термические КПД «нижнего» цикла при традиционном сжигании и плазменной газификации НСО, можно сделать вывод, что эксергетическая эффективность плазменной газификации НСО на 14% выше, чем у традиционных методов.

3. Рекомендации по нормированию и стандартизации процесса плазменной газификации НСО

Идентификация уязвимых участков процесса утилизации (газификации) НСО позволяет выделить следующие ключевые аспекты техносферной безопасности, подлежащие нормированию:

1. Экологические: существующие выбросы в атмосферу (оксида углерода; оксиды азота и оксиды серы); содержание веществ в зольном остатке; управление отходами; состав и очистка сточных вод от процесса подготовки сырья и промывки технологического оборудования; энергетическая эффективность; оценка углеродного

следа процесса по прямым и косвенным охватам;

2. Промышленная безопасность: предотвращение аварийных процессов при взрыве и утечке токсичных веществ в процессе подготовки сырья и сжигания-газификации;

3. Охрана труда оператора установки газификации НСО: напряженность труда оператора; неогражденные, движущиеся или вращающиеся элементы технологического оборудования; повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; острые кромки, заусенцы и шероховатости поверхностей инструмента, инвентаря и приспособлений и тары; повышенная загазованность воздуха рабочей зоны; повышенный уровень шума и вибрации на рабочем месте; повышенная температура поверхности оборудования; недостаточная освещенность рабочей зоны; пожаровзрывоопасность; подбор и применение соответствующих средств защиты.

Схема принципов разработки и действий стандартов плазменной утилизации НСО с точки зрения охраны труда и защиты окружающей среды представлена на рис. 8. Плазменная газификация является высокотемпературным процессом, который может быть источником выбросов в атмосферу, включая оксиды азота (NOx), образующиеся при высокотемпературных процессах, диоксид углерода (CO₂), монооксид углерода (CO), токсичные вещества, такие как тяжелые металлы. Нормирование выбросов в атмосферу осуществляется на основе контроля превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ, установления допустимых нормативов выбросов с учетом класса опасности отходов и применяемой технологии их переработки, а также использования наилучших доступных технологий газоочистки (фильтры, абсорберы, каталитические нейтрализаторы), обеспечивающих

Таблица 3. Сравнительный расчет эксэргии для единичной ПТС

Параметр	Традиционное сжигание НСО	Газификация НСО с использованием ПТС
Q – тепловая мощность		2000 кВт
T – температура газификации	1400 К	2000 К
T ₀ – температура окружающей среды (P ₀ = 1 атм.)		295 К
η _б – КПД-брутто выработки теплоты		0,911
η _н – Термический КПД «нижнего» цикла по η _т = 1 - 2T ₀ /(T + T ₀)	1-2 · 295 К/(1400 К + 295 К) = 0,652	1-2 · 295 К/(2000 К + 295 К) = 0,743
Эксергетическая мощность exQ = Qη _н	2000 кВт · 0,652 = 1304 кВт	2000 кВт · 0,743 = 1486 кВт

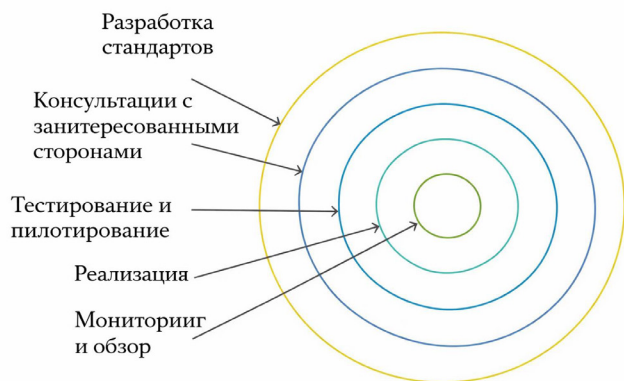


Рис. 8. Схема принципов разработки и действий стандартов плазменной утилизации НСО с точки зрения охраны труда и защиты окружающей среды.

минимизацию загрязнения окружающей среды. ПДК в Республике Казахстан приведены в табл. 4.

Воздействие на водные ресурсы также может проявляться, хотя плазменная газификация НСО не связана напрямую с водными источниками. Возможные риски для водоемов могут возникать за счет промышленных стоков, если в процессе эксплуатации оборудования не обеспечен должный контроль за качеством сточных вод, это может привести к загрязнению водоемов. Перенос загрязняющих веществ, в частности отложений в виде шлаков и других побочных продуктов, может приводить к их попаданию в водную среду при ненадлежащей утилизации. Нормирование защиты водных ресурсов включает мониторинг стоков на содержание загрязняющих веществ и применение технологий замкнутого водоснабжения и очистки сточных вод перед их сбросом в водоемы.

Процесс плазменной газификации связан также с образованием шлаков, которые могут быть либо безопасно утилизированы, либо использованы в строительстве, в том числе в производстве материалов на основе стеклообразных веществ. Важно следить за тем, чтобы оставшиеся отходы не оказывали вредного воздействия на почву. Нормы управления твердыми отходами включают в себя требования к безопасному захоронению отходов или их переработке, обеспечение надежной утилизации или повторного использования шлаков, предотвращая их попадание в природные экосистемы. Плазменная газификация требует значительных энергозатрат, связанных с расходами на электроэнергию. Нормирование энергоэффективности и углеродного следа технологии проводится на основе оценки прямого и косвенного углеродного следа процесса сжигания, использования возобновляемых источников энергии (если возможно) для минимизации углеродных выбросов.

С точки зрения охраны труда работников наиболее уязвимым является рабочее место оператора плазменной установки. Плазменная газификация НСО может создать опасности для здоровья работников и местных жителей, включая воздействие высокотемпературных процессов, токсичных газов, пыли и шума. Нормирование охраны труда и промышленной безопасности включает следующие аспекты: проектирование и использование защитных технологий для предотвращения выбросов токсичных веществ в рабочую среду; расчет и проектирование вентиляции и фильтрации в рабочей зоне; применение мониторинга на производственных площадках для контроля

Таблица 4. ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе*

Наименование вещества	Номер CAS	Формула	Величина предельно-допустимых концентраций (ПДК) (мг/м ³)	Величина ориентировочных-безопасных уровней воздействия (ОБУВ) (мг/м ³)	Класс опасности	КОД загрязняющих веществ/ Особенности воздействия на организм
Дигидросульфид	7783-06-4	H ₂ S	10	0,2	2	0
Аммиак	7664-41-7	NH ₃	20	20	4	–
Метан	74-82-8	CH ₄	50	50	4	0410
Оксисульфид углерода (карбонил-сульфид)	463-58-1	COS	0,1-2-10	0,1	2	0370

Примечание: *ист.: Приказ Министра здравоохранения РК от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-70 [69].

концентраций вредных веществ в воздухе; защита населения от негативного воздействия путем нормирования среднесуточных и максимально разовых выбросов веществ, создание санитарно-защитных зон. Плазменная газификация НСО вблизи природных экосистем или населенных пунктов требует строгой экологической оценки. Это включает в себя анализ воздействия выбросов на флору и фауну, а также возможное загрязнение почвы и водоемов. Нормирование воздействия на экосистему обеспечивается проведением экологической экспертизы проекта до начала эксплуатации установки, постоянным экологическим мониторингом в зоне влияния производства, применением технологий для минимизации воздействия на окружающую среду, таких как восстановление загрязненных территорий.

С точки зрения предотвращения аварийных ситуаций и чрезвычайных происшествий на установках плазменной газификации НСО наиболее опасными и вероятными сценариями являются взрывы или утечка токсичных веществ. Для снижения рисков необходимо нормировать разработку систем безопасности (автоматические системы тушения, аварийные отключения оборудования), планы по ликвидации последствий аварий и защитные меры для персонала и тренировки с обучением сотрудников для оперативного реагирования в случае аварийных ситуаций.

4. Заключение

Создана и обоснована принципиальная схема плазменной переработки и попутной газификации НСО «мазутных ям» Республики Башкортостан. Разработаны рекомендации по стандартизации плазменной утилизации НСО с точки зрения охраны труда и защиты окружающей среды.

Термодинамическое моделирование показало высокую эффективность плазменной газификации НСО, подтверждаемую резким снижением концентрации твердого углерода с образованием монооксида углерода и доминированием водорода в газовой фазе в оптимальном температурном интервале 1150-1500 К. Термодинамический анализ плазменно-воздушной газификации НСО продемонстрировал возможность полного разложения углеводородов, что является ключевым критерием экологически безопасной плазменной утилизации НСО.

Плазменная газификация НСО является перспективной технологией утилизации с получением горючего газа с последующей генерацией

энергии и сокращением выбросов парниковых газов. При этом необходимо учитывать воздействие на окружающую среду и возможные компромиссы, особенно с точки зрения экологии.

Преимущество плазменной технологии перед другими методами утилизации НСО заключается в более высокой энергетической эффективности и делают ее привлекательной для дальнейших исследований и разработок многих смежных дисциплин, способствующих их устойчивому развитию.

Нормирование экологических аспектов плазменной газификации НСО должно учитывать комплексное воздействие на атмосферу, водоемы, почву и здоровье человека. Важно обеспечить соблюдение строгих стандартов и норм, внедрение современных технологий очистки и мониторинга, а также регулярные проверки и корректировки экологической безопасности на всех стадиях эксплуатации установки.

Вклад авторов

Марина Нуғман: Концептуализация, Обработка данных, Проведение исследования, Программное обеспечение, Визуализация, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Ельвира Нафикова:** Концептуализация, Обработка данных, Проведение исследования, Программное обеспечение, Визуализация, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Алексей Елизариев:** Концептуализация, Методология, Администрирование проекта, Ресурсы, Надзор. **Владимир Мессерле:** Концептуализация, Привлечение финансирования, Методология, Администрирование проекта, Ресурсы, Надзор. **Александр Устименко:** Концептуализация, Обработка данных, Привлечение финансирования, Проведение исследования, Методология, Администрирование проекта, Ресурсы, Программное обеспечение, Надзор, Визуализация, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Олег Лаврищев:** Концептуализация, Обработка данных, Привлечение финансирования, Проведение исследования, Методология, Администрирование проекта, Ресурсы, Программное обеспечение, Надзор, Визуализация, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Ирек Ахияров:** Концептуализация, Надзор, Администрирование проекта, Визуализация, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Зулхаир Мансуров:** Концептуализация, Методология, Администрирование проекта, Ресурсы, Надзор. **Куаныш**

Умбеткалиев: Концептуализация, Обработка данных, Привлечение финансирования, Проведение исследования, Программное обеспечение, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Сандугаш Танирбергенова:** Концептуализация, Обработка данных, Проведение исследования, Ресурсы, Программное обеспечение, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Нуржамал Жылыбаева:** Концептуализация, Обработка данных, Проведение исследования, Ресурсы, Программное обеспечение, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование. **Дилдара Тугелбаева:** Концептуализация, Обработка данных, Проведение исследования, Ресурсы, Программное обеспечение, Подготовка черновика, Написание текста – рецензирование и редактирование.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность

Научная работа поддержана Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан в виде гранта ПЦФ BR24992915.

References

- [1]. R. Fedeli, S. Celletti, D. Alexandrov, E. Nafikova, S. Loppi. Biochar-mediated bioremediation: a sustainable strategy to increase *Avena sativa* L. tolerance to crude oil soil contamination. *Environmental Science and Pollution Research* 31 (2024) 52774-52783. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34732-6>.
- [2]. R. Fedeli, D. Alexandrov, S. Celletti, E. Nafikova, S. Loppi. Biochar improves the performance of *Avena sativa* L. grown in gasoline-polluted soils. *Environmental Science and Pollution Research* 30 (2023) 28791-28802. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24127-w>.
- [3]. M.I. Ramirez, A.P. Arevalo, S. Sotomayor, N. Bailon-Moscoso. Contamination by oil crude extraction and their effects on human health. *Environmental Pollution* 231 (2017) 415-425. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.017>.
- [4]. M. Oliveira, A. Ramos, T.M. Ismail, E. Monteiro, A. Rouboa. A Review on Plasma Gasification of Solid Residues: Recent Advances and Developments. *Energies* 15 (2022) 1475. <https://doi.org/10.3390/en15041475>.
- [5]. V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, O.A. Lavrichshev, M.K. Nugman. The Gasification and Pyrolysis of Biomass Using a Plasma System. *Energies* 17 (2024) 5594. <https://doi.org/10.3390/en17225594>.
- [6]. V.E. Messerle, A.L. Mosse, A.B. Ustimenko. Processing of biomedical waste in plasma gasifier. *Waste Management* 79 (2018) 791-799. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.048>.
- [7]. V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, A.O. Lavrichshev, M.K. Nugman. Methods for quantifying the efficiency of using a solid fuel plasma igniter. *Combustion and Plasma Chemistry* 22(2024) 71-79. [https://doi.org/10.18321/cpc22\(2\)71-79](https://doi.org/10.18321/cpc22(2)71-79).
- [8]. V.E. Messerle, O.A. Lavrichshev, A.B. Ustimenko. Plasma-chemical waste processing: numerical analysis and experiment. Part 4. Ash-and-slag waste and oil refinery wastes. *Thermophysics and Aeromechanics* 30 (2023) 823-828. <https://doi.org/10.1134/S0869864323040169>.
- [9]. E. Leal-Quirós. Plasma processing of municipal solid waste. *Brazilian Journal of Physics* 34 (2004) 1587-1593. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332004000800015>.
- [10]. T. Ryo, Y. Tsuyoshi, I. Yoshinori. Direct Decomposition of Waste Oil in Plasma-Assisted Combustion under Reduced Pressure. *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 37 (2011) 408-410. <https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.37.408>.
- [11]. K. Moustakas, D. Fatta, S. Malamis, K. Haralambous, M. Loizidou. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials* 123 (2005) 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.038>.
- [12]. M.F.S. Gonçalves, G.P. Filho, A.A. Couto, A.S. Sobrinho, F.S. Miranda, et al. Evaluation of thermal plasma process for treatment disposal of solid radioactive waste. *Journal of Environmental Management* 311 (2022) 114895. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114895>.
- [13]. M. Pourali. Application of Plasma Gasification Technology in Waste to Energy: Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 1 (2010) 125-130. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2010.2061242>.
- [14]. R.C. Sanito, S.J. You, Y.F. Wang. Application of plasma technology for treating e-waste: A review. *Journal of Environmental Management* 288 (2021) 112380. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112380>.
- [15]. International Energy Agency (IEA). Oil Market Report - September 2024. IEA, Paris, 2024. Available online: <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-september-2024>.
- [16]. E.A. Mazlova, S.V. Meshcheryakov. Problems of oil

- sludge utilization and methods of its processing. Monograph. Noosphere, 2001. P. 56. (In Russ.).
- [17]. B. Chen, H. Yan, H. He. Treatment of acidify waste fluid in oilfield by neutralization/iron chipping micro-electrolysis/oxidation/coagulation four process. *Applied Mechanics and Materials* 295-298 (2013) 1267-1272. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.295-298.1267>.
- [18]. R.R. Ibatulin, I.I. Mutin, M.N. Iskhakova, K.G. Sakhabutdinov. Study of properties of oil sludge and methods of its utilization. *Oil Industry* 11 (2006) 21-25. (In Russ.).
- [19]. G. Zhu, Z. Xie, H. Xu, N. Wang, L. Zhang, et al. Oil spill environmental risk assessment and mapping in coastal China using automatic identification system (AIS) data. *Sustainability* 14 (2022) 5837. <https://doi.org/10.3390/su14105837>.
- [20]. O.A. Johnson, A.C. Affam. Petroleum sludge treatment and disposal: A review. *Environmental Engineering Research* 24 (2019) 191-201. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.134>.
- [21]. G. Aitkaliyeva, M. Yelubay, A. Ismailova, S. Massakbayeva, A. Baisariyeva. Oil Sludge and Methods of Its Disposal. *Polish Journal of Environmental Studies* 31 (2022) 5563-5569. <https://doi.org/10.15244/pjoes/152226>.
- [22]. M.M. Gertsen, V.A. Arlyapov, L.V. Perelomov, A.S. Kharkova, A.N. Golysheva, et al. Environmental Implications of Energy Sources: A Review on Technologies for Cleaning Oil-Contaminated Ecosystems. *Energies* 17 (2024) 3561. <https://doi.org/10.3390/en17143561>.
- [23]. E. Obi, F. Kamgba, D. Obi. Techniques of Oil Spill Response in the Sea. *IOSR Journal of Applied Physics* 6 (2014) 36-41. <https://doi.org/10.9790/4861-06113641>.
- [24]. C.J.S. Galdino, A.D. Maia, H.M. Meira, T.C. Souza, J.D.P. de Amorim, et al. Use of a bacterial cellulose filter for the removal of oil from wastewater. *Process Biochemistry* 91 (2020) 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.12.020>.
- [25]. K.G. Steinhäuser, G.A. Von, O.M. Große, W. Körner. The necessity of a global binding framework for sustainable management of chemicals and materials: Interactions with Climate and Biodiversity. *Sustainable Chemistry* 3 (2022) 205-237. <https://doi.org/10.3390/suschem3020014>.
- [26]. E.S. Okeke, C.O. Okoye, E. Chidike, G. Mao, Y. Chen, et al. Emerging bio-dispersant and bioremediation technologies as environmentally friendly management responses toward marine oil spill: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management* 322 (2022) 116123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116123>.
- [27]. M. Wang, X. Liu. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. *Journal of Hazardous Materials* 408 (2021) 124420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124420>.
- [28]. I.G. Clayson, D. Hewitt, M. Hutereau, T. Pope, B. Slater. High throughput methods in the synthesis, characterization, and optimization of porous materials. *Advanced Materials* 32 (2020) 2002780. <https://doi.org/10.1002/adma.202002780>.
- [29]. J.E. Vidonish, K. Zygourakis, C.A. Masiello, G. Sabadell, P.J.J. Alvarez. Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review. *Engineering* 2 (2016) 426-437. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.005>.
- [30]. M.C. Weng, C.L. Lin, C.L. Lee. Effect of Heat-Treatment Remediation on the Mechanical Behavior of Oil-Contaminated Soil. *Applied Sciences* 10 (2020) 3174. <https://doi.org/10.3390/app10093174>.
- [31]. C.L. Lin, M.Y. Wey. Effects of High Temperature and Combustion on Fluidized Material Attrition in a Fluidized Bed. *Korean Journal of Chemical Engineering* 20 (2003) 1123-1130. <https://doi.org/10.1007/BF02706947>.
- [32]. E.I. Bakhonina. Modern technologies for processing and utilization of hydrocarbon-containing waste. *Bashkir Chemical Journal* 22 (2015) 20-29. (In Russ.).
- [33]. D.A. Dubovtsev, U.E. Allayarov, E.N. Abdrakhmanova. Oil sludge: storage and accumulation. Safety and disposal issues. *Oil and Gas Business* 5 (2019) 31-47. (In Russ.).
- [34]. H.Y. Jiang, A.J. Wei, S.J. Zheng, F. Liu, J. Cheng. A Study on the Mechanism of Harmless and Resourceful Treatment of Oil Sludge with Microwave. *Advanced Materials Research* 356-360 (2011) 1831-1834. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.356-360.1831>.
- [35]. M.S. Mat-Shayuti, Y. Tuan, M.Z. Abdullah, K. Megat, N.H. Othman. Progress in ultrasonic oil-contaminated sand cleaning: A fundamental review. *Environmental Science and Pollution Research* 26 (2019) 26419-26438. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05954-w>.
- [36]. N. Xu, W. Wang, P. Han, X. Lu. Effects of ultrasound on oily sludge deoiling. *Journal of Hazardous Materials* 171 (2009) 914-917. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.091>.
- [37]. F. Chen, B. Yang, J. Ma, J. Qu, G. Liu. Decontamination of electronic waste-polluted soil by ultrasound-assisted soil washing. *Environmental Science and Pollution Research* 23 (2016) 20331-20340. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7271-3>.
- [38]. A.F. Akhmetov, A.R. Gaysina, I.A. Mustafin. Methods of utilization of oil sludge of different origins. *Oil and Gas Business* 9 (2011) 108-111. (In Russ.).

- [39]. U. Michael-Igolima, S.J. Abbey, A.O. Ifelebuegu. A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. *Environmental Advances* 9 (2022) 100319. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319>.
- [40]. T. Raytchev, S. Rousseva. *Physico-Chemical Methods for Remediation of Contaminated Soils*, Encyclopedia of Earth Sciences Series. 2011, p. 596. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_117.
- [41]. H.F. Su, J.F. Lin, Q.Y. Wang. A clean production process on oily sludge with a novel collaborative process via integrating multiple approaches. *Journal of Cleaner Production* 322 (2021) 128983. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128983>.
- [42]. N. Vasudevan, P. Rajaram. Bioremediation of oil sludge-contaminated soil. *Environment International* 26 (2001) 409-411. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(01\)00020-4](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(01)00020-4).
- [43]. Y. Doszhanov, A. Sabitov, Z. Mansurov, G. Kayirmanova. Bioremediation of oil-contaminated Soils of the Zhanazhol Deposit from West Kazakhstan by *Pseudomonas mendocina* H-3. *Applied and Environmental Soil Science* (2024) 8510911. <https://doi.org/10.1155/2024/8510911>.
- [44]. E. Koshlaf and A.S. Ball. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted Environments. *AIMS Microbiology* 3 (2017) 25-49. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.1.25>.
- [45]. M. Romantschuk, K. Lahti-Leikas, M. Kontro, P. Galitskaya, H. Talvenmäki, et al. Bioremediation of contaminated soil and groundwater by in situ biostimulation. *Frontiers in Microbiology* 14 (2023). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1258148>.
- [46]. R. Mourão, A.R. Marquesi, A.V. Gorbunov, G.P. Filho, A.A. Halinouski, et al. Thermochemical Assessment of Gasification Process Efficiency of Biofuels Industry Waste with Different Plasma Oxidants. *IEEE Transactions on Plasma Science* 43 (2015) 3760-3767. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2416129>.
- [47]. A.L. Meena, M. Karwal, D. Dutta, R.P. Mishra. Composting: Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting. *Agriculture & Food e-Newsletter* 3 (2021) 85-90. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13546.95689>.
- [48]. M. Gorokhovski, E.I. Karpenko, F.C. Lockwood, V.E. Messerle, B.G. Trusov, et al. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory. *Journal of the Energy Institute* 78 (2005) 157-171. <https://doi.org/10.1179/174602205X68261>.
- [49]. V.I. Golish, E.I. Karpenko, V.G. Luk'yashchenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, et al. Long-Service-Life PlasmaArcTorch. *HighEnergyChemistry* 43(2009)318-323. <https://doi.org/10.1134/S0018143909040134>.
- [50]. V.E. Messerle and A.B. Ustimenko. Plasma Technologies of Solid and Gaseous Fuels Processing. *Progress in Exergy, Energy, and the Environment* (2014) 977-990. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04681-5_93.
- [51]. V.E. Messerle and A.B. Ustimenko. Thermodynamic and kinetic modeling and experiment on plasma ignition of pulverized high-ash coal. *Applications in Energy and Combustion Science* 17 (2024) 100248. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2024.100248>.
- [52]. M. Grist. Environmental management and technology in oil refineries. *Environmental Technology in the Oil Industry* (2016) 375-392. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24334-4_11.
- [53]. I. Dincer and C. Zamfirescu. 1.3 Environmental Dimensions of Energy. *Comprehensive Energy Systems* 1(2018) 49-100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00103-6>.
- [54]. S. Jenkins. ChemInnovations: Plasma-enhanced gasification offers improved waste disposal. *Chemical Engineering* 117 (2010).
- [55]. V.A. Zhovtyansky, E.P. Kolesnikova, M.V. Iakymovych. Plasma-assisted “waste-to-energy” processes. *Problems of Atomic Science and Technology* 107 (2017) 231-236.
- [56]. ASTM D6357-2021. Standard Test Methods for Determination of Trace Elements in Coal, Coke, and Combustion Residues from Coal Utilization Processes by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, and Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry. 2021. Available online: <https://store.astm.org/d6357-21b.html>.
- [57]. VDI 2267 Blatt 1. Determination of suspended matter in ambient air - Measurement of the element concentration after sampling on filters. 2012. Available online: <https://standards.globalspec.com/std/14254238/VDI%202267%20BLATT%201>.
- [58]. GOST R 71608-2024. Optics and Photonics. Laser-Plasma Surface Treatment of Steel and Alloy Parts. Terms and Definitions. Classification. 2024. (In Russ.). Available online: <https://internet-law.ru/gosts/gost/83535/>
- [59]. ISO 921:1997. Nuclear Energy - Vocabulary. 1997. Available online: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/5333/ca8e94bc2aab447fbbfdba6a6a56d034/ISO-921-1997.pdf>.
- [60]. Order No. 656 of December 9, 2020. On Approval of the Federal Norms and Rules in Industrial Safety: “Safety Rules for Processes for Obtaining or Using Metals.” 2020. (In Russ.). Available online: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-204-20210308-230410.pdf>.
- [61]. Order of the Minister of Labor and Social Protection

- of the Republic of Kazakhstan dated February 12, 2024, No. 30. On Approval of the Unified Tariff and Qualification Handbook of Workers' Jobs and Professions. 2024. (In Russ.). Available online: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G24G0000030>.
- [62]. Recommendation of the Board of the Eurasian Economic Commission dated February 28, 2017, No. 5. On the List of Priority Areas of Cooperation Between the Member States of the Eurasian Economic Union in Order to Accelerate Technological Modernization and Enhance the Innovative Activity of Organizations of the Member States, Taking into Account Applied and Fundamental Research Conducted by the Member States. 2017. (In Russ.). Available online: <https://www.alta.ru/tamdoc/17rs0005/?ysclid=mizubdue8y83529428>.
- [63]. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 004/2011. On the Safety of Low-Voltage Equipment. 2011. (In Russ.). Available online: <http://www.tngz.ru/dld/004-2011.pdf>.
- [64]. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan. On the Strategic Plan of the Ministry of Industry and New Technologies of the Republic of Kazakhstan for 2011–2015. 2011. (In Russ.). Available online: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1100000102>.
- [65]. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated November 8, 2002, No. 1181. On the Conclusion of the Cooperation Agreement Between the Government of the Republic of Kazakhstan and the European Atomic Energy Community in the Field of Controlled Nuclear Fusion. 2002. (In Russ.). Available online: <https://zakon.uchet.kz/rus/docs/P020001181>.
- [66]. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated January 23, 2024, No. 24. On Approval of the Reference Book on Best Available Techniques “Energy Efficiency in the Implementation of Economic and (or) Other Activities.” Information and Legal System of Regulatory Legal Acts of the Republic of Kazakhstan. 2024. (In Russ.). Available online: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000024>.
- [67]. E.V. Kalinina, L.V. Rudakova. Life Cycle Assessment of Management and Disposal of Oil-Containing Wastes from Refineries. *Ecology and Industry of Russia* 25 (2021) 38-43. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-38-43>.
- [68]. R.B. Williams, B.M. Jenkins, D. Nguyen. Solid Waste Conversion: A Review and Database of Current and Emerging Technologies. *Energy Safety and Energy Economy* 4 (2014) 154-178.
- [69]. Information and Legal System of Regulatory Legal Acts of the Republic of Kazakhstan. 2026. (In Russ.). Available online: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029011>.

Сведения об авторах

М.К. Нугман – докторант, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: nugmanmarina@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3366-5348>

Е.В. Нафикова – PhD, доцент кафедры безопасности производства и промышленной экологии, УУНИТ, Уфа, Россия
E-mail: nafikova.ev@ugatu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5197-8928>

А.Н. Елизариев – PhD, доцент, зав. кафедрой безопасности производства и промышленной экологии, УУНИТ, Уфа, Россия
E-mail: elizarev.an@ugatu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5612-8121>

В.Е. Мессерле – д.т.н., профессор, КазНУ им. аль-Фараби, ГНС Института проблем горения, Казахстан
E-mail: ust@physics.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4281-1429>

А.Б. Устименко – д.т.н., КазНУ им. аль-Фараби, ГНС Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: ust@physics.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2629-6167>

О.А. Лаврищев – к.ф.-м.н., доцент, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: oleg.lavrishev@kaznu.edu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5934-8381>

И.И. Ахияров – магистрант, УУНИТ, Уфа, Россия

З.А. Мансуров – д.х.н., профессор, Институт проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: zmansurov@kaznu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8956-216X>

К.А. Умбеткалиев – PhD, зав. лабораторией плазмохимии Института проблем горения, старший преподаватель, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: kuanush.umbetkaliyev@kaznu.edu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5576-672X>

С.К. Танирбергенова – к.х.н., ведущий научный сотрудник Института проблем горения, Казахстан
E-mail: sandu2201@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6377-0913>

Н.К. Жылыбаева – к.х.н., ведущий научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: icp30@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8047-916X>

Д.А. Тугелбаева – научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: dilya.12@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7860-5710>

Technosphere Safety, Standardization of Plasma Gasification of Oil-Containing Waste: Thermodynamic and Exergy Analysis

M.K. Nugman¹, E.V. Nafikova², A.N. Elizariev², V.E. Messerle^{1,3}, A.B. Ustimenko^{1,3}, O.A. Lavrichshev¹, I.I. Akhiyarov², Z.A. Mansurov^{1,3}, K.A. Umbetkaliyev^{1,3}, S.K. Tanirbergenova³, N.K. Zhylybaeva³, D.A. Tugelbaeva³

¹Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan

²FSBEI oHE Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi Str., 32, Ufa, Russia

³Institute of Combustion Problems, Bogenbai Batyr Str., 172, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

The accumulation of oil-containing waste (OCW) is one of the most pressing environmental problems, leading to a disruption of biodiversity, an imbalance in biocenoses, and changes in the chemical and structural properties of the soil, impairing natural regeneration and aeration, as well as causing the degradation of flora and fauna. A key challenge for the scientific community is the development of effective methods for OCW disposal, with an emphasis on rapid implementation and sustainable development. One promising approach is plasma gasification of OCW – a technology based on the use of plasma to decompose and utilize various types of waste. Compared to traditional waste disposal processes, plasma gasification is associated with high energy consumption and increased qualification requirements for personnel operating plasma equipment. Implementation of plasma technology requires further study and the development of regulatory regulations, norms, and standards in this area. This article examines aspects of technosphere safety and standardization of plasma gasification method for OCW, including occupational health and safety and environmental issues, as well as ways to minimize potential negative impacts. A thermodynamic and exergy analysis of OCW plasma gasification was performed. International regulatory documentation governing the use of plasma technologies for NSO utilization was analyzed. An algorithm for applying plasma technologies in OCW processing was developed. A technology for plasma utilization of mixed NSO from "fuel oil pits" was also tested in the Republic of Bashkortostan (Russia). A schematic diagram of the NSO utilization process in a plasma reactor was developed, the necessary equipment was calculated, and the thermodynamic conditions for the plasma gasification of OCW were modeled using the TERRA code. Recommendations for standardizing plasma OCW utilization from an occupational health and safety and environmental perspective are presented.

Keywords: plasma gasification, plasma reactor, oil-containing waste, oil sludge, standardization, thermodynamics, exergy, technosphere safety.

Техносфера қауіпсіздігі, мұнайқұрамды қалдықтарды плазмалық газификациясын нормалау: термодинамикалық және эксергиялық талдау

М.К. Нұғман¹, Е.В. Нафикова², А.Н. Елизариев², В.Е. Мессерле^{1,3}, А.Б. Устименко^{1,3}, О.А. Лаврищев¹, И.И. Ахияров², З.А. Мансуров^{1,3}, К.А. Умбеткалиев^{1,3*}, С.К. Танирбергенова³, Н.К. Жылыбаева³, Д.А. Түгелбаева³

¹Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даң., 71, Алматы, Қазақстан

²Уфа мемлекеттік ғылым және технология университеті ФМББМ ЖББ, Заки Валиди к., 32, Уфа, Ресей

³Жану проблемалар институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

АҢДАТПА

Мұнайқұрамды қалдықтардың (МҚҚ) жиналуы биологиялық түрлі бұзылуына, биоценоздардың теңгерімсіздігіне және топырақтың химиялық және құрылымдық қасиеттерінің өзгеруіне әкелетін ең өзекті экологиялық мәселелердің бірі болып табылады, бұл табиғи қалпына келу мен аэрацияны бұзады, сондай-ақ флора мен фаунаның деградациясына әкеледі. Ғылыми қауымдастық үшін маңызды міндеттерінің бірі, ол жедел енгізуге және тұрақты даму тұжырымдамасына баса назар аудара отырып, МҚҚ-ны жоюдың тиімді әдістерін әзірлеу. Перспективалы тәсілдерінің бірі – МҚҚ-ны плазмалық газификациясы, әртүрлі қалдықтарды ыдырату және пайдалану үшін плазманы пайдалануға негізделген технология. Дәстүрлі қалдықтарды жою үдерістермен салыстырғанда, плазмалық газификация жоғары энергия тұтынуымен және плазмалық жабдықты пайдаланатын

мамандардың біліктілігіне қойылатын талаптардың артуымен байланысты. Плазмалық технологияны іске асыру үшін осы саладағы нормативтік актілерді, нормалар мен стандарттарды одан әрі зерттеуді және әзірлеуді талап етеді. Мақалада техносфера қауіпсіздігінің аспектілері және МҚҚ-ны плазмалық газификация арқылы пайдалану әдісін стандарттау, соның ішінде еңбекті қорғау және қоршаған орта қауіпсіздігі мәселелері, сондай-ақ ықтимал теріс факторларды азайту жолдары қарастырылған. МҚҚ-ны плазмалық газификациясының термодинамикалық және эксергиялық талдауы орындалған. МҚҚ-ны жою үшін плазмалық технологияларды пайдалануды реттейтін халықаралық нормативтік құжаттама талданды. МҚҚ-ны плазмалық қайта өңдеу технологияларды қолдану алгоритмі әзірленген. Аралас МҚҚ-ны «мазут шұңқырлары» плазмалық қайта өңдеу технологиясы Башқұртстан Республикасында (Ресей) да сынақтан өтті. Плазмалық реакторда МҚҚ-ны пайдалану үдерісінің негізгі диаграммасы жасалды, үдерістің жүзеге асыру үшін қажетті құрылғылар есептелді және TERRA бағдарламасы көмегімен МҚҚ-ны плазмалық газификация үдерісін жүзеге асырудың термодинамикалық шарттары пішіндеді. Еңбек қауіпсіздігі және қоршаған ортаны қорғау тұрғысынан МҚҚ-ны плазмалық жоюдың стандарттау бойынша ұсыныстар көрсетілген.

Түйін сөздер: плазмалық газификация, плазмалық реактор, мұнайқұрамды қалдықтар, нефтешлам, стандартизация, термодинамика, эксергия, техносфералық қауіпсіздік.