

Министерство образования и науки Украины
Кременчугский национальный университет
имени Михаила Остроградского

На правах рукописи

Примірник дисертації і дві копії з іншими примірниками

ВАМБОЛЬ Виола Владиславовна

Врешній секретар

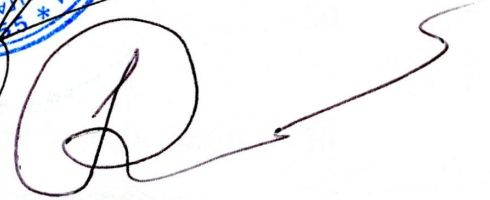


Холми

Голова спецради

10.03.16р.

Семчук Л.М.
УДК 628.477



**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ
УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

Специальность 21.06.01 – экологическая безопасность

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант д.т.н., профессор,
Шмандий Владимир Михайлович

Кременчуг 2016

d 569



ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	6
РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ	17
1.1. Анализ состояния вопроса и проблем обращения с твердыми углеродсодержащими отходами	17
1.2. Вопросы концептуального характера, связанные с обеспечением экологической безопасности	30
1.3. Характеристика способов утилизации твердых углеродсодержащих отходов с точки зрения экологической безопасности	36
1.4. Анализ источников формирования экологической опасности при переработке и утилизации углеродсодержащих отходов и возможности их устранения	42
1.5. Цель и задачи исследования	50
РАЗДЕЛ 2. СОЗДАНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ	52
2.1. Системный подход к разработке экологически безопасного процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов	52
2.2. Компоненты системы управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов	54
2.3. Формализация решения задачи управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов	60
2.4. Функции технологической системы утилизации отходов и ее компоненты	64
2.5. Системный подход как условие повышения эффективности	

	3
систем управления экологической безопасностью процессов утилизации	68
2.6 Формирование концепции создания модели управления экологической безопасностью процессов утилизации твердых углеродсодержащих отходов	69
2.7. Методологическая схема решения поставленных задач исследования	72
2.8. Выводы по разделу	74
РАЗДЕЛ 3. ДИСТАНЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ	75
3.1. Обоснование выбора способа обнаружения источников формирования экологической опасности техногенного характера	76
3.2. Исследование и анализ характеристик мест скопления отходов	79
3.3. Дистанционное зондирование и расшифровка космических снимков при обнаружении мест несанкционированных мест скопления отходов	81
3.4. Практическая реализация разработанной модели выявления и определения параметров мест несанкционированного скопления отходов	94
3.5. Выводы по разделу	111
РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ	113
4.1. Экологически эффективная утилизация с применением плазменных источников энергии	113
4.2. Предотвращение повторного образования диоксинов во время охлаждения генераторного газа	119
4.3. Теоретические вопросы метанирования и очистки газовой смеси после ее охлаждения я	138

4.4. Теоретические вопросы низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей, полученных при газификации отходов 141

4.5. Выводы по разделу 186

РАЗДЕЛ 5. УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ УТИЛИЗАЦИЮ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ 188

5.1. Разработка конструкции печи для смешанной газификации твердых углеводородсодержащих отходов 189

5.2. Разработка конструкции устройства для охлаждения генераторного газа, полученного при утилизации отходов 206

5.3. Конструкция реактора метанирования 208

5.4. Система очистки газа 213

5.5. Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом утилизации отходов 215

5.6. Выводы по разделу 222

РАЗДЕЛ 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ И ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ 223

6.1. Численное моделирование процессов в испарительном теплообменнике 223

6.2. Численный эксперимент по определению времени охлаждения генераторного газа до безопасной температуры 264

6.3. Численное моделирование процессов низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей в энерготехнологической установке 274

6.4. Выводы по разделу

279

РАЗДЕЛ 7. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

281

7.1. Целесообразность применения разработанной экологически
безопасной технологии утилизации отходов

281

7.2. Энергетическая оценка экологически безопасного процесса
утилизации отходов

283

7.3. Экономическая оценка технологического процесса утилизации
отходов

288

7.4. Экономическая оценка эффекта от реализации экологически
безопасной технологии утилизации

294

7.5. Выводы по разделу

296

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

297

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

300

ПРИЛОЖЕНИЯ

337

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Появление новых технологий и материалов, рост населения и сферы потребления все это приводит к появлению и быстрому увеличению объемов отходов, опасных для окружающей природной среды. Проблема отходов актуальна не только Украины, но и для всего мира. В соответствии с законом Украины «Об отходах» под опасными отходами понимают отходы с физическими, химическими, биологическими или другими опасными свойствами, которые создают или могут создать значительную опасность для окружающей природной среды и здоровья человека и требуют специальных методов и средств обращения с ними. Такие отходы содержат широкий спектр компонентов: высокотоксичных, радиоактивных, инфицированных, опасных в травматологическом отношении и т. п.

Следует выделить отдельную группу опасных отходов – медицинские отходы и фальсифицированные, некачественные, фальшивомаркированные лекарственные препараты, которые запрещено складировать на полигонах и они должны быть утилизированы. Их утилизация требует немедленного решения, так как в Украине ежегодно образуется 380...400 тыс. тонн таких отходов, среди которых 100...120 тыс. тонн опасные. Причиной этого является высокая плотность населения, особенно крупных городов, низкий уровень состояния здоровья населения, формируется множеством социально-экономических факторов, и рост количества лечебных, лечебно-профилактических и оздоровительных учреждений.

По данным сайта Департамента экологии и природных ресурсов Харьковской области в 2014 году, среди образованных отходов, отходы I (чрезвычайно опасные) и II (высокоопасные) классов опасности составили - 0,929 тыс. тонн. В западных регионах Украины сосредоточено большое количество лечебно-профилактических и оздоровительных учреждений государственной и частной форм собственности. По данным сайта

официальных сайтов областных государственных администраций на территории Львовской области ежегодно образуется около 5400 т шприцев и других отходов, Ивано-Франковской области в течение года образуется около 50 т медицинских отходов [77, 123, 153, 196, 221]. В тоже время в результате домашнего лечения в составе твердых бытовых отходов нередко встречаются медицинские, которые составляют примерно 2 % от всей массы бытовых отходов [213]. Случаи, когда опасные и медицинские отходы не передаются на утилизацию, а смешиваются с твердыми бытовыми отходами и попадают на полигоны и несанкционированные свалки, приводят к повышению риска распространения туберкулеза, заражения взрослых и детей вирусами гепатита В и С, микроорганизмами различных болезней, другими вирусными инфекциями и заражения природной среды.

В настоящее время система обращения с отходами базируется на экстенсивных методах захоронения без учета возможности использования вторичных ресурсов. Однако такой подход не решает указанную проблему, а скорее ведет к ситуации с эффектом «снежного кома». Ко всему сказанному выше следует добавить, что ситуация с опасными отходами обостряется значительным ростом количества несанкционированных мест их скопления [4, 21, 22, 131, 197, 243]. Не смотря на то, что в департаментах экологии и природных ресурсов существует единая база данных о существующих полигонах и свалках отходов, экологи регулярно выявляют несанкционированные места скопления отходов. Так, в департаменте экологии и природных ресурсов Киевской областной государственной администрации считают, что стихийные свалки являются большой проблемой в Киевской области и их количество ежегодно растет [195]. Не являются исключением в этом плане и другие регионы Украины, о чем свидетельствуют и официальные сайты органов управления и средства массовой информации.

Полигоны, свалки и несанкционированные места скопления опасных отходов испускают токсические вещества в окружающую среду. Основные

из них: бензол, дибромэтилен, винил хлорид, дихлорэтилен, трихлорэтилен, четыреххлористый этилен, хлороформ, хлористый метилен, четыреххлористый углерод [132, 190, 287].

Проблема обращения с отходами в Украине с каждым годом обостряется, а внедрение современных технологий их переработки сопровождается значительными трудностями. В последнее время на этой почве в ряде областей возникли социальные конфликты, что указывает на необходимость принятия срочных и адекватных мер на всех уровнях управления [96, 126, 160].

Вопросы утилизации отходов являются остроактуальными, поскольку их решение связано с необходимостью обеспечения нормальной жизнедеятельности населения, санитарной очистки городов, охраны окружающей среды и ресурсосбережения.

Как отмечают руководители профильных министерств, Украина стоит на пороге создания новой отрасли, которая позволит снизить социальное напряжение и выйти на современный уровень обращения с ТБО. По данным Минрегионстроя Украины (до декабря 2010 г. Министерство жилищно-коммунального хозяйства) в 2010 г. в стране работало восемь мусоросортировочных линий и два мусоросжигательных завода. На стадии строительства находятся еще 12 сортировочных комплексов, три мусороперерабатывающих завода и два объекта обращения с ТБО, включающих установки сжигания отходов. Оценка текущей ситуации экспертами Национального проекта «Чисте місце» свидетельствует о необходимости создания сети мусороперерабатывающих комплексов, десять из которых на уровне пилотных проектов планируется внедрить в ближайшие пять лет в крупных городах и областных центрах [136, 137, 160].

Вместе с тем, поиск инженерных решений наталкивается на ряд препятствий, в том числе отсутствие достоверной информации о морфологическом составе и свойствах ТБО. В состав отходов, образующихся в стране, входит широкий спектр компонентов. Материалы

исследовательских групп и международных проектов фрагментарны и не содержат системного подхода к решению проблемы.

Отсутствие на общегосударственном уровне эффективной системы обращения с твердыми отходами, в том числе и опасными, приводит к загрязнению окружающей природной среды, развитию различных заболеваний и как следствие к снижению уровня экологической безопасности. На наш взгляд наиболее важным, с научной точки зрения является разработка экологически безопасной технологии утилизации твердых отходов для повышения эффективности системы управления экологической безопасностью и в целях снижения нагрузки на окружающую природную среду.

Таким образом, научно-прикладная задача создания системы управления экологической безопасностью при утилизации опасных отходов является актуальной.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Тематика диссертационной работы отвечает приоритетным направлениям развития науки и техники в Украине на период до 2020 г. по разделу «Раціональне природокористування» и стратегическим приоритетным направлениям инновационной деятельности в Украине на 2011 – 2021 гг. «Охорона навколишнього природного середовища».

Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательских работ, которые проводились в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» в соответствии с планами научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Украины, а именно: ДР № 0100U002200 «Основи математичного моделювання і прогнозування безпеки техногенних об'єктів аерокосмічної техніки», ДР № 0106U001029 «Математичне моделювання етапів життєвого циклу аерокосмічних виробів та методика визначення чисельних критеріїв безпеки», ДР № 0106U001030 «Математичне моделювання процесів утилізації літальних апаратів та об'єктів спецтехніки», ДР № 0109U001391

«Модельовання процесів утилізації елементів літальних апаратів, ракетного палива, боєприпасів генераторами плазми з попереднім спалюванням», ДР № 0115U001221 «Розробка концепції створення технологічних систем збирання: базування, закріплення і з'єднання - транспортних засобів з використанням імпульсних ручних пристроїв. Розробка нових методів і засобів для утилізації відходів».

Результаты работы являлись частью комплексных исследований в рамках НИР, проводимых Национальным аэрокосмическим университетом им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» по теме «Розробка процесів утилізації літальних апаратів, об'єктів аерокосмічної та спеціальної техніки».

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является разработка компонентов системы управления экологической безопасностью при обращении с твердыми углеродсодержащими отходами, а также экологически безопасной технологии их утилизации.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

– создание методологических основ исследования и разработки эффективных систем управления экологической безопасностью при утилизации отходов;

– анализ современных научных разработок для обеспечения экологической безопасности в процессе утилизации и вторичной переработки твердых углеродсодержащих отходов;

– создание системы обеспечения оперативного выявления мест несанкционированного скопления отходов и их идентификации на основе метода анализа материалов дистанционного зондирования отдельных участков земной поверхности;

– разработка общей модели технологического процесса экологически безопасной утилизации твердых углеродсодержащих отходов;

– разработка технологических устройств и оборудования, обеспечивающих процесс утилизации твердых углеродсодержащих отходов;

– на основе численного моделирования оценка возможности предотвращения образования высокотоксичных веществ при реализации технологического процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов;

– оценка эффективности разработанной технологии утилизации твердых углеродсодержащих отходов по энергетическим и экономическим показателям.

Объект исследования – процессы экологически безопасного обращения с твердыми углеродсодержащими отходами.

Предмет исследования – закономерности обеспечения экологической безопасности при утилизации твердых углеродсодержащих отходов.

Методы исследования: методологическая основа теоретических исследований базируется на использовании системного научно обоснованного анализа систем управления экологической безопасностью.

При решении задач исследования возможностей формирования экологически безопасного процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов применялись теория дифференциальных уравнений в частных производных и численное моделирование. Основой является непосредственное применение законов сохранения массы и количества движения в неоднородной по компонентному и фазовому составу среде, включающей генераторный газ, водяные капли и водяные пары. Математической форме записи законов сохранения для узкого газа (пара) является уравнение Навье-Стокса, для капель – уравнение баланса действующих на каплю сил, которая уравнивает ее инерцию с равнодействующей сил тяжести и аэродинамического сопротивления.

При разработке энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей используются основные соотношения термодинамики, теплопередачи, тепломассобмена и гидрогазодинамики, в том числе уравнение состояния Пенга-Робинсона для описания коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел. Общие уравнения

теплопроводности использовались для определения теплового потока при расчете элементов конструкции технологической установки.

В экспериментальных исследованиях использовались современные методы определения компонентного состава сырья, продуктов технологического процесса, состава генераторного газа.

Для исследования средств управления экологической безопасностью использовались методы физического моделирования от опытных образцов к опытно-промышленной установке.

Научная новизна полученных автором результатов:

1. Впервые научно обосновано использование экологически безопасной утилизации отходов и средств для ее реализации, что позволяет предложить конкретные технические решения для управления экологической безопасностью.

2. Впервые созданы научные основы применения технических устройств и систем для охлаждения отходящих газов, использование которых предотвращает повторное формирование высокотоксичных веществ и тем самым способствует обеспечению экологической безопасности.

3. Получил дальнейшее развитие научный подход к созданию системы оперативного выявления мест несанкционированного скопления отходов на основе использования данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий в сочетании с методами математического моделирования в части выделения углеродсодержащей составляющей отходов, что позволяет повысить эффективность проведения экологического мониторинга.

4. Получили дальнейшее развитие научные основы создания эффективных экологически безопасных технологий утилизации твердых углеродсодержащих отходов и средств для ее реализации, которые в отличие от существующих, не только позволяют использовать полученный энергоноситель для поддержания процесса утилизации, но и учитывают

суточную и сезонную неравномерность потребления энергии и позволяют производить метансодержащий энергоноситель, пригодный для хранения.

5. Усовершенствованы научные подходы к созданию модели автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом путем введения дополнительных параметров контроля, что позволяет осуществлять мониторинг всех этапов процесса утилизации отходов и обеспечивает возможность ее интеграции в общую систему обеспечения экологической безопасности.

Практическое значение полученных результатов:

– применение разработанной системы оперативного выявления мест несанкционированного накопления отходов позволяет определять характер отходов и динамику развития свалки;

– использование в реальных условиях разработанной технологической установки для утилизации твердых углеродсодержащих отходов позволяет на практике реализовать предложенную технологию с целью обеспечения экологической безопасности;

– предложен автоматизированный программно-аппаратный комплекс, который позволяет в интерактивном режиме осуществлять текущий контроль и управление технологическим процессом экологически безопасной утилизации твердых углеродсодержащих отходов в единой интегрированной среде;

– разработаны технические решения системы управления экологической безопасностью процесса утилизации отходов, которые могут быть использованы при разработке систем обращения с отходами в разных регионах Украины.

Результаты исследований по созданию экологически безопасного процесса утилизации опасных отходов использованы в учебном процессе Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского в нормативных дисциплинах «Экологическая безопасность», «Общая экология и неозология» (акт внедрения результатов диссертационной работы от

03.09.2015 г.), методики и способы экспериментальных исследований, системный подход при создании и обеспечении управления экологической безопасностью внедрены в учебный процесс Национального университета гражданской защиты Украины в нормативной дисциплине «Техноэкология», в дисциплине по выбору ВУЗа «Безопасность потенциально опасных технологий и производств» (акт внедрения результатов диссертационной работы от 07.04.2015 г.).

Методики расчета устройств для создания водяных завес, предотвращающих распространение загрязнителей, внедрены на производственных предприятиях ООО «Азовавтобуд» (акт внедрения результатов диссертационной работы от 3.12.2009 г.) и ТД ВО «Машиностроительный завод» (акт внедрения результатов диссертационной работы от 09.02.2016 г.), способ утилизации твердых отходов внедрен на производственном предприятии ООО «Универсалтехсервис» (акт внедрения результатов диссертационной работы от 21.05.2013 г.), способ утилизации твердых углеродсодержащих отходов и рекомендации по определению параметров технических устройств и систем для охлаждения отходящих газов, использование которых препятствует повторному формированию высокотоксичных веществ внедрены на производственном предприятии ООО «Автрамат» (акт внедрения результатов диссертационной работы от 17.02.2015 г.), усовершенствованная модель автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом утилизации отходов путем введения дополнительных параметров контроля, внедрены на предприятии ООО «Институт горно-химического промышленности» (акт внедрения результатов диссертационной работы от 26.01.2016 г.).

Личный вклад соискателя. Все основные научные идеи, положения и результаты теоретических исследований диссертации разработаны, сформулированы и получены лично автором.

Теоретические обобщения, разработка математических моделей, анализ и интерпретация полученных данных, выводы по работе выполнены

непосредственно соискателем. Экспериментальные исследования и промышленные испытания, внедрение в производство полученных результатов произведено под научным руководством и при непосредственном участии соискателя.

Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, заключался в обосновании направлений исследований, планировании экспериментов и обработке результатов, теоретическом и физическом моделировании процессов, разработке практических рекомендаций по применению, научно-технической разработке рациональных технологических процессов, руководящей роли на всех этапах работы. Автору также принадлежат общие выводы и основные положения, которые выносятся на защиту.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях различных уровней: «Авіаційно-космічна техніка і технологія» присвячена 75-річчю національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» 2005 г. (Украина, г. Харьков), «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» в 2005 – 2014 гг. (Украина, г. Харьков), «Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України» в 2006 г. (Украина, г. Запорожье), «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» в 2007 – 2014 гг. (Украина, г. Харьков), Всеукраинской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» 2014 г. (Украина, г. Кременчуг), Межвузовской научно-практической конференции «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» в 2006 – 2013 гг. (Украина, г. Харьков), «Проблеми екологічної безпеки» в 2014 г. (Украина, г. Кременчуг), «Теория и практика тушения пожаров и ликвидации чрезвычайных ситуаций» в 2014 г. (Украина, г. Черкассы), «Проблемы техносферной безопасности» в 2014 – 2015 гг. (Россия, г. Москва), «Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях» в

2014 г. (Россия, г Екатеринбург), «Проблемы безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» в 2014 – 2015 гг. (Россия, г Воронеж), «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства» в 2015 г. (Россия, г Краснодар), «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» в 2015 г. (Беларусь, г Минск), «Research Journal of International Studies» в 2014 г. (Россия, г. Екатеринбург), а также на научных семинарах кафедры прикладной механики Национального университета гражданской защиты Украины, кафедры химии, экологии и экспертных технологий Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» в 2007 – 2015 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 54 научных труда, из них две монографии, 7 статей в иностранных изданиях, 18 статьи, которые входят в список профессиональных научных изданий Украины, один патент Украины и 27 тезисов докладов в сборниках трудов конференций, в том числе и зарубежных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи разделов, выводов, списка использованных источников и приложений.

Полный объем диссертации составляет 367 страницы, в том числе 131 рисунок, 14 таблиц, список использованных литературных источников из 314 наименований на 36 страницах, и 31 страница приложений.



d 569

РАЗДЕЛ 1



ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

1.1. Анализ состояния вопроса и проблем обращения с твердыми углеродсодержащими отходами

Нормативная база Украины по вопросам обращения с отходами довольно широка. Основным нормативным документом, регулирующим обращение отходов, является Закон Украины «Об отходах» от 5 марта 1998 г. № 187/98-ВР, с изменениями и дополнениями [180]. Он определяет правовые, организационные и экономические принципы деятельности, связанной с предотвращением или уменьшением объемов образования отходов, их сбором, перевозкой, хранением, сортировкой, обработкой, утилизацией и удалением, обезвреживанием и захоронением, а также с предотвращением негативного влияния отходов на окружающую среду и здоровье человека.

Согласно Статьи 1 [180], под понятием «отходы» следует подразумевать любые вещества, материалы и предметы, которые образовались в процессе производства или потребления, а также товары, полностью или частично потеряли свои потребительские свойства и не имеют дальнейшего использования по месту их образования или выявления. Под понятием «опасные отходы» – следующее: отходы, имеющие такие физические, химические, биологические или другие опасные свойства, которые создают или могут создать значительную опасность для окружающей природной среды и здоровья человека и которые требуют специальных методов и средств обращения с ними.

В окружающей среде отходы выступают, с одной стороны, как загрязнения, занимающие в ней (окружающей среде) определенное пространство и оказывающие негативное воздействие на другие живые и неживые объекты и субстанции, а с другой стороны – как вторичные материальные и энергетические ресурсы для возможной утилизации или рекуперации непосредственно вслед за образованием или после соответствующей переработки. При этом под переработкой отходов понимается осуществление любых технологических операций, связанных с изменением физических, химических или биологических свойств отходов с целью подготовки их к экологически безопасному хранению, перевозке, утилизации или удалению.

При рассмотрении такого вопроса, как «отходы – объект утилизации», требуется определить, что подразумевается под словом «утилизация». Большая советская энциклопедия предлагает такое определение: утилизация (франц. utilisation, от лат. utilis – полезный) – употребление с пользой, использование. Согласно ДСТУ 2195-99 [81] утилизация отходов – это использование отходов как вторичных материальных или энергетических ресурсов, а удаление отходов – это осуществление операций с отходами, которые не приводят к их утилизации.

В зарубежной литературе [296] часто встречается такое понятие, как «рециклирование», прежде всего обращенное к материальному объекту, т. е. рециклирование – это повторное использование материала.

Разнообразие отходов, образующихся в процессе человеческой деятельности, очень велико. Для определения методов обращения с отходами стандартом ДСТУ 3910-99 определена классификация отходов, а именно порядок определения наименования отходов в соответствии с их состоянием, процессом образования, видом экономической деятельности и отнесения отходов к существующим классам, группам или другим категориям.

Для Украины вопросы утилизации отходов являются особенно актуальными, так как первичные ресурсы в Украине не безграничны, а по

большинству видов вообще отсутствуют. В эксплуатацию вовлекаются месторождения с более сложными горно-геологическими и техническими условиями освоения. В результате не только повышаются материальные, энергетические и трудовые затраты, но и увеличивается количество отходов.

В последнее время в ряде европейских стран классификация отходов производится с позиций их экологической безопасности. Однако такой подход затрудняет процесс оценки отходов как сырья или материалов с целью дальнейшего использования их в сфере производства и потребления [256, 257, 260]. Степень опасности отходов для окружающей среды зависит от класса и концентрации токсичных веществ, содержащихся в отходах, а также от синергического эффекта нескольких компонентов.

В настоящее время ситуация с отходами – угрожающая для экологической безопасности, а вопросы сокращения их образования и ограничения замусоривания окружающей среды являются в Украине наиболее острыми. Прогрессирует процесс накопления отходов, возникают несанкционированные свалки, не решается проблема обращения с опасными отходами [4, 12, 21, 22, 77, 104, 126]. Особенно острой остается проблема утилизации отходов из класса опасных и особо опасных.

Серьезного внимания требуют медицинские отходы, которые в эпидемиологическом отношении достаточно опасны, поскольку они содержат яйца гельминтов и патогенные микроорганизмы [41, 59, 70, 123, 153, 161]. Кроме того, медицинские отходы также вполне могут быть загрязнены радиоактивными или токсичными веществами

Медицинские отходы являются основным источником поступления вредных химических, химико-биологических и биологических элементов в окружающую среду. Также эти виды отходов являются источником повышенной опасности для всех тех, кто с ними соприкасается. Это объясняется тем, что существует риск выхода инфекций за пределы учреждений здравоохранения. В группу повышенного риска попадает персонал медучреждений, пациенты и лица, отвечающие за обезвреживание

отходов и последующую транспортировку.

Медицинские отходы включают самые разные материалы:

– инфекционные отходы: отходы, контаминированные кровью и другими жидкостями организма (например, использованные диагностические образцы), культуры и запасы инфекционных агентов в лаборатории (например, отходы после аутопсии и инфицированных животных в лаборатории) или отходы от пациентов, находящихся в изолированных палатах, и использованное оборудование (например, тампоны, перевязочные материалы и одноразовые медицинские устройства);

– патологические отходы: ткани, органы или жидкости организма человека, части тела и зараженные трупы животных;

– острые предметы: шприцы, иглы, одноразовые скальпели, лезвия и т. п.;

– химические вещества: растворители для приготовления лабораторных проб, дезинфицирующие средства и тяжелые металлы, содержащиеся в медицинских устройствах (например, ртуть в разбившемся термометре), и элементы питания;

– фармацевтические препараты: просроченные, неиспользованные и контаминированные лекарства и вакцины;

– генотоксичные отходы: крайне опасные, мутагенные, тератогенные или канцерогенные вещества, такие как цитотоксичные лекарства, используемые для лечения рака, и их метаболиты;

– радиоактивные отходы: продукты, контаминированные радионуклидами, включая радиоактивный диагностический материал или радиотерапевтические материалы;

– неопасные отходы или обычный мусор: отходы, которые не создают никакой особой биологической, химической, радиационной или физической опасности.

Ориентировочное (расчетное) количество медицинских отходов, образующихся в Украине, составляет приблизительно 350 тыс. т/год. По данным экспертов ВОЗ, все более угрожающие масштабы на мировом фармацевтическом рынке приобретает проблема обращения фальсифицированных лекарственных средств. Доля фальсифицированных лекарственных препаратов на рынках развивающихся стран составляет от 10 (данные FDA) до 25 % (данные ВОЗ) [59]. В результате домашнего лечения образуется большое количество медицинских отходов, которые и составляют примерно 2 % от всей массы бытовых отходов и приносят вред экологии [213]. Приведенные оценки значительно разнятся ввиду отсутствия научно-обоснованной методологии мониторинга фальсифицированных лекарственных препаратов, а также единых подходов к определению и интерпретации данных, которыми оперируют различные эксперты.

Официальные данные по количеству лекарственных средств с истекшим сроком годности, а также утративших потребительские качества по иным причинам, отсутствуют. Непригодные к медицинскому использованию лекарственные средства относятся к опасным отходам из-за угрозы здоровью людей и состоянию окружающей природной среды.

В соответствии с законом [151] в стране есть необходимость внедрить мероприятия по созданию эффективной системы контроля за утилизацией и уничтожением фальсифицированных, некачественных лекарственных средств, в том числе тех, срок годности которых истек.

По данным ВОЗ [212] наибольшая часть медицинских отходов является не более опасной, чем обычные отходы в домашнем хозяйстве. Однако некоторые виды отходов при медико-санитарном обслуживании представляют большой риск для здоровья человека. Такие отходы включают инфекционные материалы (они составляют от 15 % до 25 % всех отходов в результате оказания медико-санитарной помощи), которые состоят из острых предметов (1 %), частей человеческого тела (1 %), химических или

фармацевтических отходов (3 %), а также радиоактивных и цитотоксических отходов или сломанных термометров (менее 1 %). При неправильном обращении с такими отходами они представляют угрозу для здоровья работников здравоохранения, тех, кто занимается утилизацией отходов, и угрозу инфицирования общества. Отсутствие осведомленности об опасностях для здоровья, связанных с отходами медицинских учреждений, недостаточная подготовка по правильной обработке и удалению отходов, отсутствие систем обработки и удаления отходов, недостаточные финансовые и кадровые ресурсы, а также низкий приоритет, придаваемый этим вопросам, являются самыми распространенными проблемами, связанными с медицинскими отходами. Многие страны либо не имеют надлежащего нормативного регулирования, либо не обеспечивают его соблюдение [212].

По данным, опубликованным на сайте украинской ассоциации «Международный экологический союз», ежегодно наши лечебно-профилактические учреждения производят более 1 млн. т медицинских отходов. В лучшем случае эти отходы отправляют его на окологородские полигоны или мусоросжигательные заводы (этот факт признает Министерство экологии). Однако, нередко горы использованных шприцов, окровавленных перчаток, бинтов и катетеров оказываются в дворовых контейнерах для бытового мусора [http://medpharmconnect.com/Education_and_career/Articles/6697.htm].

Ситуация в настоящее время такова, что существуют серьезные ограничения по захоронению отходов на полигонах, так как они ведут к загрязнению почвы и окружающей природной среды [256, 274]. При этом управление местами захоронения является проблемой и основанием для волнений по причине наличия опасных компонентов в составе отходов. Известно, что в 1 г бытового мусора содержится до 1 млрд.

микроорганизмов, а в медицинских отбросах их число возрастает до 200 – 300 млрд. [78].

Городские свалки, кладбища и придорожные овраги, - это зачастую места захоронения медицинских отходов. Экологи находят одноразовые шприцы, иглы, перевязочные материалы, упаковки от вакцин [70]. На полигон твердых бытовых отходов ежедневно свозятся миллионы тонн мусора, в том числе и отходы медицинских и профилактических учреждений. По документам - это обычный бытовой мусор, но никто не может гарантировать, что там нет опасных медицинских отходов. Такая ситуация связана с отсутствием достаточных мощностей для утилизации [70]. В связи с тем, что темпы переработки отходов очень малы и полигоны для захоронения отходов перегружены, требуется отчуждения новых больших территорий земель. А так как на это нет специальных разрешений, то наблюдается постоянный рост количества нелегальных свалок. Такая ситуация приводит к рассеиванию токсичных веществ в окружающую природную среду и значительному снижению уровня экологической безопасности.

Кроме медицинских отходов, не меньшую опасность для окружающей природной среды представляют отходы полимерных материалов [19, 136, 137, 154], поскольку пластик относится к неразлагаемым отходам. Полимерные материалы являются компонентами преобладающего большинства видов товаров народного потребления и промышленных товаров.

Развитие пластмасс началось с использования природных пластических материалов (жевательной резинки, шеллака), затем продолжилось с использованием химически модифицированных природных материалов (резина, нитроцеллюлоза, коллаген, галалит) и, наконец, пришло к полностью синтетическим молекулам (бакелит, эпоксидная смола, поливинилхлорид, полиэтилен и другие). Сейчас их насчитывается несколько десятков видов полимерных материалов, например, пенополиэтилен,

полипропилен, полиэтилентерафталат (ПЭТ), полистирол, пенополистирол (пенопласт), поливинилхлорид (ПВХ), полиакрилат (органическое стекло), полиамид (ПА), полиуретан и др.

Применение полимерных композиционных материалов является одним из основных направлений во многих областях экономики. Полимерные композиционные материалы по объемам использования в мире существенно опередили многие материалы. В закупаемом в настоящее время в производство новом поколении самолетов будет использовано до 50 % конструкционных композитов. Полимеры как конструкционные материалы широко применяются в цветной металлургии, химической и пищевой промышленности и целлюлозно-бумажной и полиграфическом деле, строительстве, машино- и приборостроении, а также в производстве товаров народного потребления. Это обусловлено следующими основными потребительскими и технологическими свойствами полимеров, как: высокая стойкость к агрессивным органическим и неорганическим химическим веществам, исключительно высокие и гибкие декоративные свойства, крайне высокая технологичность изготовления из них готовых деталей, достаточно высокие прочностные качества и др. Особенно ценна достигнутая вариативность сочетания этих свойств. В качестве наиболее часто используемых материалов для армирования конструкционных композитов используются волокна, тканые материалы или пленки, изготовленные из углерода [252].

К недостаткам таких материалов традиционно относят следующие: дороговизна и экологическая опасность технологического процесса получения самих полимеров, ограниченность ресурсных баз для их производства, узкий диапазон эксплуатационных температур.

Однако, в последнее время в свете экспоненциального роста производства полимеров, обусловленного темпами их потребления, а также малости части их утилизации [62], следует выделить проблему экологически

безопасного обращения с их отходами – накопления, переработки, утилизации и захоронения. Это проблема содержит несколько составляющих, а именно:

– многие полимеры в своем составе содержат опасные и вредные химические компоненты и могут выделять их в окружающую природную среду при воздействии на них определенных факторов (температуры, солнечного света);

– сами изделия из полимеров, исчерпав положенный ресурс, могут содержать остатки веществ, с которыми контактировали в процессе эксплуатации (тара и емкости) и также могут выделять их в окружающую природную среду при воздействии на них определенных факторов (температуры, солнечного света, воды, природных сорбентов);

– полимеры склонны к химическому старению, т. е. изменению химического состава и/или структуры во времени. Не все закономерности этих процессов изучены достаточно полно и их последствия не всегда предсказуемы;

– полимеры пожароопасны и могут служить причинами возгорания;

– полимеры или их отдельные компоненты, как химически стойкие в нормальных условиях вещества, практически не разлагаются под воздействием ни биологических, ни химических факторов и, накапливаясь на полигонах и в местах несанкционированного захоронения твердых бытовых отходов, загромаждают естественные ареалы обитания флоры и фауны;

– широкая номенклатура наименований полимеров и, соответственно, особенностей их химического состава и структуры, а значит и способов экологически безопасной утилизации.

Если не предпринимать меры по утилизации отходов из полимерных материалов, то планета задохнется в их горах.

Увеличение объема потребления полимеров приводит к загрязнению почв и грунтовых вод продуктами неполного разложения их отходов, росту территорий свалок, отчуждению земельных угодий. В странах, где охране

окружающей среде придают большое значение, законодательство обязывает перерабатывать полимерные отходы. Однако на практике возможность утилизации часто ограничивается их свойствами, менее стабильными по сравнению с исходным материалом. Для производства некоторых видов продукции применение вторичного сырья вообще запрещено санитарными нормами. Но в первую очередь использование вторичных ресурсов определяют действующее законодательство и вопросы экономической целесообразности [104, 188].

Отдельно стоит упомянуть, что благодаря своему химическому составу, который определяется химическим составом сырья для их получения и технологии процесса полимеризации, отходы полимеров становятся мощным сырьевым и энергетическим ресурсом.

Первое связано с тем, что зачастую сырьем для их производства являются нефть, природный газ или их производные, относящиеся к невозобновляемым, дефицитным и потому дорогим ресурсам. Таким образом, производство полимеров конкурирует с производством моторных топлив и масел. Также это позволяет сократить расходы не первичного, а поэтому дефицитного и дорогого вида энергии – электрической [19, 210]. Поэтому переработка отходов полимеров с целью получения новых изделий – актуальное направление исследований. Однако такие технологические процессы являются энергозатратными.

Второе связано с тем, что процессы, составляющие суть термической утилизации таких веществ – экзотермические реакции, то есть сами отходы полимеров могут выступать топливами. Поэтому термическая утилизация твердых отходов полимеров может если не окупиться, то, как минимум, удешевиться. Однако при этом возникают трудности с обезвреживанием газообразных и твердых продуктов сгорания полимеров.

Выделение токсинов при разложении полимерных материалов оказывает негативное влияние на экологическую обстановку регионов. Масштабы проблем, связанных с опасностью полимеров для окружающей среды, можно представить, если принять во внимание, что мировое производство одного из наиболее распространенных и доступных полимеров – полиэтилена достигает сегодня десятков миллионов тонн в год.

Таким образом, в настоящее время необходим поэтапный, технически и научно обоснованный переход от полигонного захоронения отходов полимерных материалов к их промышленной переработке путем разработки проектов и создания опытно-экспериментальных производств по комплексной их утилизации.

Широкое применение пластиков и различных полимерных материалов приводит к возрастанию в отходах доли углерода и углеродсодержащих соединений, что обуславливает увеличение количества различных поллютантов, включая супертоксичные, как диоксины и фураны. Углеродсодержащие органические материалы являются основой многих видов отходов, в том числе и опасных, таких как медицинские отходы (табл. 1.1, 1.2) [1].

Многие такие отходы не разлагаются в обычных условиях и представляют опасность для человека и окружающей природной среды, выделяя токсичные вещества при определенных метеорологических условиях, например в жаркую погоду при нагревании. Другие углеродсодержащие органические образуют поллютанты при разложении, сжигании и переработке. Оба случая ведут к снижению уровня экологической безопасности.

К опасным отходам так же можно отнести отходы в местах нелегального захоронения и складирования, ввиду отсутствия документов, предусмотренных законодательством, которые подтверждают их безопасность для здоровья населения и окружающей природной среды.

Таблица 1.1. Ориентировочный морфологический состав медицинских отходов, %

Морфологический состав	Медицинские отходы
Бумага, картон	30,32
Пищевые отходы	6,47
Текстиль	55,41
Полимерные материалы	6,29
Стекло	0,78
Резина, кожа	0,16
Операционные отходы	0,24
Дез. агенты, непригодные к использованию лекарственные препараты	0,12
Металл (в т. ч. цветной)	0,11
Гипс, камни, керамика	0,10

Основными принципами государственной политики в сфере обращения с отходами (ст. 5 [180]) является приоритетная защита окружающей среды и здоровья человека от негативного воздействия отходов, обеспечение экономного использования материально-сырьевых и энергетических ресурсов, научно обоснованное согласование экологических, экономических и социальных интересов общества относительно образования и использования отходов с целью обеспечения устойчивого развития.

Таблица 1.2. Теплотехнические характеристики медицинских отходов

Компоненты	Кол-во от общей массы %	Элементный состав на рабочую массу, %								Выход летуч. %	Q ^p ккал/ кг
		C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	Cl ^p	A ^p	W ^p		
Бумага, картон	30,32	8,65	1,15	8,82	0,05	0,04	-	4,55	7,06	23,6	688
Пищевые отходы	6,47	0,81	0,12	0,52	0,06	0,01	-	0,29	4,66	4,67	53
Текстиль	55,41	8,21	0,99	4,72	0,71	-	-	4,43	36,35	42,7	2083
Полимерные материалы	5,29	3,02	0,35	0,01	-	-	1,08	0,16	0,67	4,8	327
Стекло	0,78	-	-	-	-	-	-	0,73	0,05	-	-
Операционные отходы	0,24	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	-	0,01	0,12	0,23	20
Резина	0,16	0,12	0,01	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,13	53
Дез. агенты, непригодные к использованию лекарственные препараты	1,12	0,03	0,01	0,03		0,01	1,0	0,01	0,03	0,09	8
Металл	0,11	-	-	-	-	-	-	0,11	-	-	-
Гипс	0,10	-	-	-	-	-	-	0,10	-	-	-
Общее содержание	100	20,9	2,65	14,14	0,83	0,08	2,08	10,4	48,94	76,2	3232

К наиболее важным из основных направлениям государственной политики по реализации указанных принципов относятся (ст. 5 [180]):

– обеспечение полного сбора и своевременного обезвреживания и удаления отходов, а также соблюдение правил экологической безопасности

при обращении с ними;

– обеспечение комплексного использования материально-сырьевых ресурсов;

– содействие максимально возможной утилизации отходов путем прямого повторного или альтернативного использования ресурсно-ценных отходов.

1.2. Вопросы концептуального характера, связанные с обеспечением экологической безопасности

Концепция устойчивого развития предполагает систему мер по обеспечению экологической безопасности. Экологическая безопасность – состояние защищенности биосферы и человеческого общества, а на государственном уровне – государства от угроз, возникающих в результате антропогенных и природных воздействий на ОС. В понятие экологической безопасности входит система регулирования и управления, позволяющая прогнозировать, не допускать, а в случае возникновения – ликвидировать развитие чрезвычайных ситуаций [16]. Экологическая безопасность рассматривается как составляющая национальной безопасности [16, 17, 20].

Управление экологической безопасностью является составной частью системы управления, которая связана с комплексом проблем жизнеобеспечения человека. Вопросы по этой проблематике конкретизируют и детализируют научные труды А. И. Данилова, Ю. М. Саталкина, В. Я. Шевчука, А. Д. Липенкова, И. В. Масленниковой, В. М. Навроцкого, В. Н. Федосеева и других ученых.

На региональном уровне система управления экологической безопасностью включает экологизацию экономики, новые экологически безопасные технологии и выдерживание темпов экономического развития, не

препятствующих восстановлению качества окружающей природной среды и способствующих рациональному использованию природных ресурсов.

Многоаспектные теоретические и практические исследования по управлению экологической безопасностью проводятся в работах М. М. Быченка, М. В. Маслова, В. М. Шмандия, А. М. Касимова, Г. Д. Коваленко, С. С. Рыжова, Л. Д. Пляцука, М. С. Малеваного, Т. Ф. Жуковского и других ученых.

В последнее время углубляются и детализируются знания из различных научных направлений: технико-экономического (Б. М. Данилишин, А. Н. Трофимчук, В. М. Шмандий, А. Г. Шапарь, Е. А. Яковлев, В. Р. Лозанский, И. А. Шеренков, А. В. Гриценко, И. П. Крайнов, В. М. Шестопалов, Л. Д. Пляцук, М. С. Малеваный, А. Б. Горстко и др.), природного (Г. А. Билявский, И. Г. Черванев, В. И. Осипов, А. Л. Рагозин, С. К. Шойгу, Е. С. Дзекцер, А. Б. Качинский, Е. А. Яковлев, О. М. Адаменко, В. Я. Шевчук, В. М. Шестопалов, И. Пригожин, В. А. Котляревский, А. В. Забегаева, А. В. Луцки, Я. М. Семчук). Экологическая безопасность государства рассматривается как составляющая национальной безопасности (А. Б. Качинский, В. А. Косовцев и др.).

Процесс формирования экологической опасности, как правило, носит спонтанный, хаотический характер. При этом изменения в окружающей среде могут носить критический, напряженный, удовлетворительный и условно благоприятный характер [99]. Кроме того, в таких экологических ситуациях постоянно присутствует техногенная и природно-антропогенная нагрузка, которая не носит явно выраженного экстремального характера. Следовательно, разработка комплексной системы обеспечения безопасности означает переход от хаотичного развития системы до ее управляемости [239–241]. Под системой управления понимается множество закономерно взаимосвязанных элементов управления (целей, структуры, задач, технологий, персонала), объединенных в единый механизм, способный достигать поставленных целей, принимать скоординированные эффективные

решения [9, 57, 97]. Необходимо обратить внимание на понятийно-терминологический аппарат управления экологической безопасностью. Так, в работе [20] используется понятие «управление экологическими ситуациями», которое трактует его как «...система действий, направленных на достижение определенного уровня качества окружающей среды, который обеспечил бы нормальное функционирование геосистемы, ее средо- и ресурсовоспроизводящие свойства, здоровую среду обитания для человека, успешное функционирование социальной сферы и экономики, обеспечивающих материальные и духовные потребности людей». В этом отношении требует конкретизации термин «успешное функционирование».

В работе [136] предлагаются следующие пути управления экологической безопасностью: организация такой хозяйственной деятельности, которая обеспечила бы рациональное природопользование и оптимальный (нормативный) режим функционирования природных систем; активное воздействие на природную среду, перевод ее из одного состояния в другое. По первому направлению рассматривается совокупность мероприятий, регламентирующих преимущественно действия в периоды неблагоприятных метеоусловий. Второй путь требует специальных научных обоснований, подготовки, значительных расходов на его осуществление по каждому из направлений возникновения опасности.

Некоторые исследователи анализируют управление экологической безопасностью с позиций обеспечения минимизации возможного ущерба от загрязнения природной среды и воздействия на здоровье человека. В работе [136] разработаны математические формализованные модели управления техногенными воздействиями, основанные на социально-экономических подходах, однако рассмотрен лишь один вид техногенной опасности - радиационный. Общим недостатком приведенных подходов является отсутствие всесторонних разработок аспектов регионального управления экологической безопасностью.

Важным элементом служит система основных принципов обеспечения экологической безопасности. В. И. Измалков [89] выделяет следующие положения:

– комплекс организационно-технических, социально-экономических и других мероприятий должен быть адекватен антропогенным воздействиям, приводящим к отклонению от допустимых значений параметров, характеризующих экологическую обстановку;

– экологическое обеспечение необходимо рассматривать с конкретной привязкой к функционированию объектов, формирующих опасность;

– целесообразность достижения минимально возможных уровней риска антропогенного воздействия на объекты биосферы и происходящие в ней негативные изменения не превышают научно допустимых их значений;

– универсальность организации управления экологическим обеспечением и преемственность организационных форм и методов экомониторинга в условиях нормального функционирования источников антропогенного воздействия и в аварийных ситуациях;

– взаимодействие и организационная взаимосвязь всех государственных, ведомственных и территориальных структур, выполняющих функции экологического обеспечения;

– гибкость организационных форм, допускающая сосредоточение усилий на тех или иных проблемах обеспечения экологической безопасности.

Указанные положения не противоречат принципам управления в целом и управлению экологической безопасностью в частности, хотя изложенные тезисы требуют конкретизации.

Для определения сущности управления экологической безопасностью важным является структурирование уровней воздействия. Авторы работы [248] выделили следующие уровни экологической безопасности: объекты безопасности, их жизненно важные интересы; угрозы жизненно важным интересам; основные направления государственной политики по обеспечению безопасности в экологической сфере как часть единой

государственной политики по обеспечению устойчивого развития страны; система неотложных мер правового, организационно-управленческого, эколого-экономического, научно-методологического, инженерно-технического, воспитательного и иного характера, направленных на нейтрализацию угроз жизненно важным интересам объектов; система обеспечения безопасности; комплекс мер противодействия угрозам. По результатам анализа изложенного подхода можно отметить, что следует все-таки разделять цели (объекты и угрозы) и инструменты их достижения (меры, политика, системы обеспечения).

Управление экологической безопасностью в последнее время связывают с системой экологических рисков. При этом рассматривают методологию управления экологическими ситуациями, основанную на количественной оценке техногенных воздействий. В работе [18] выделены техногенные, природные, военные, социально-экономические, политические и террористические факторы риска экологической опасности и классифицированы риски экологической природы в различных аспектах, включая литогеохимические, гидрогеологические, инженерно-геодинамические составляющие (не противоречит мнению авторов [9]). В работе [9] обосновывается важность учета экологического риска, однако не приводится его количественная оценка. Авторы работы [136] выделяют виды рисков, которые можно использовать в качестве критериев безопасности: максимально допустимый экологический риск, который не должен превышать независимо от экономического или социального вида деятельности; приемлемый экологический риск, т.е. область, в пределах которой производится поиск оптимальных экономических решений, обеспечивающих безопасность; пренебрежимый экологический риск, который составляет 1 % от максимально допустимого риска.

Некоторые исследователи считают, что оценка эффективности управления экологической безопасностью должна стать обязательным элементом при принятии решений по стимулированию экономической

деятельности предприятия [248]. При оценке инвестиционной привлекательности в качестве количественной меры ее экологической составляющей предлагается рассматривать величину отклонения реального значения опасности (риска) предприятия от приемлемого уровня риска.

Приведенный выше анализ развития научных представлений относительно управления экологической безопасностью позволяет сделать следующие выводы:

- имеются положительные тенденции в развитии данного научного направления;
- существует терминологическое многообразие: используются такие термины, как «экологическое управление», «управление технико-экологической безопасностью», «управление в чрезвычайных ситуациях», «экологический менеджмент» и другие;
- мероприятия по управлению экологической безопасностью в большинстве случаев имеют общепостановочный характер и требуют конкретизации;
- рассматриваются методики оценки в основном отдельных видов экологической опасности;
- практическое применение предлагаемых моделей и систем ограничено несовершенством информационной базы при определении предлагаемых показателей, индексов, характеристик состояния анализируемых экосистем;
- в научных разработках широко представлены экономические методы управления, но в меньшей степени обоснованы меры технического обеспечения управленческих решений.

Для разработки компонентов системы управления экологической безопасностью при обращении с твердыми углеродсодержащими отходами и создания экологически безопасной технологии их утилизации требуется детальный анализ современных способов утилизации, с конкретизацией факторов формирующих опасность.

1.3. Характеристика способов утилизации твердых углеродсодержащих отходов с точки зрения экологической безопасности

В мировой практике наибольшее распространение получили термические способы утилизации отходов. Основной экологической задачей при утилизации твердых углеродсодержащих отходов является снижение вредных выбросов в окружающую среду. Анализ распространенных способов утилизации твердых углеродсодержащих отходов показал следующее.

Сжигание (инсенерация) заключается в огневой окислительной обработке отходов продуктами сгорания дополнительного топлива. При этом токсичные органические компоненты подвергаются полному окислению с образованием CO_2 , H_2O , N_2 , а минеральные составляющие извлекаются в виде твердых продуктов или расплава. Во время инсенерации отходы сжигаются в специальном оборудовании и при сжигании выделяются соединения ртути, свинца, кадмия, диоксины и другие токсичные вещества. По мнению Агентства по защите окружающей среды, не существует безопасного уровня выброса диоксинов в окружающую среду, поскольку они настолько опасны, что в любой концентрации могут существенно повысить риск онкологических заболеваний. Медицинские инсинераторы являются третьими по величине источниками выбросов диоксинов, а также источником 10 % выбросов ртути. Сжигание применяют для сокращения объема отходов, однако оно применимо не для всех видов отходов. Такие соединения как хлорид, фторид, и тяжелые металлы остаются в золе и являются вторичным источником опасности для природной среды, только в более сильной степени [264, 265, 267, 285]. Например, при сжигании отходов, содержащих хлорид, образуются токсичные вещества, такие как диоксины или фураны. Исследования показали, что 53 % всех общих выбросов диоксинов в атмосферу приходится на установки для сжигания медицинских отходов [197].

Проблему эпидемиологической опасности биологических и медицинских отходов решает способ с применением химических утилизаторов, однако появляется проблема токсических отходов, которые нуждаются в дальнейшей нейтрализации, поэтому химическая утилизация биологических отходов большого распространения не получила. Главным недостатком химических утилизаторов – необходимость постоянного использования дорогого запатентованного дезинфектанта, при отсутствии которого процесс теряет смысл [70, 161, 213]. Кроме того, пользователи отмечают повышенную шумность при работе аппарата для химической утилизации медицинских отходов и очень высокую влажность отходов на выходе. Дороговизна технического обслуживания аппарата для химической утилизации медицинских отходов и запасных частей также заставляет некоторых потенциальных покупателей отказаться от приобретения таких установок.

Важное место среди методов термического разложения отходов принадлежит пиролизу - термическому разложению органических веществ с целью получения полезных продуктов. В отличие от сжигания, процесс послойного пиролиза отходов в условиях недостатка кислорода, организованный в шахтной печи, приводит, в основном, к разложению сложных и тяжелых органических молекул на более простые фрагменты.

Наряду с прямым сжиганием и газификацией пиролиз является эффективным методом термохимической переработки любых материалов и веществ, в том числе и экологически опасных отходов. Пиролиз представляет собой процесс термического разложения органических соединений без доступа кислорода и происходит при относительно низких температурах (500...800 °С) по сравнению с процессами газификации (800...1300 °С) и горения (900...2000 °С). Перспективам использования современных технологий термохимической газификации и пиролиза посвящены исследования [258, 268].

Во многих странах данная технология является наиболее отработанной и требующей наименьшей подготовки отходов к процессу. Ведущие позиции на рынке занимают печи германской фирмы «Штайнмюллер», заслуживают внимания переталкивающие решетки фирмы «Нойль» (Германия), «Мартин» (Германия) и «Фостер Уиллер» (США) [306]. Реализация данной технологии позволяет уменьшить объем отходов примерно в 10 раз, снизить риск загрязнения почвы и воды токсичными веществами отходов и дает возможность рекуперации образующегося тепла. Однако высокий выход золы и шлаков (около 30 % по массе), опасность загрязнения атмосферы высокотоксичными веществами, прежде всего, полихлорированными дибензо-*p*-диоксинами и дибензофуранами, полициклическими ароматическими углеводородами, и низкая эффективность восстановления черных металлов приводят к необходимости поиска новых решений.

В результате пиролиза образуются твердый углеподобный остаток, содержащий высокотоксичные вещества и требующий, обезвреживания или специального захоронения, и пиролизный газ с содержанием высококипящих смолообразных веществ. Теплота сгорания газа около 13 – 21 МДж/м³. При низких температурах пиролиза (около 400...600 °С) образуется больше жидких смолообразных продуктов, а при высоких (около 700...900 °С) – больше газообразных продуктов.

Анализ зарубежной и отечественной технической литературы показывает, что учеными проводятся исследования по изучению возможности применения газификации различных органических отходов (твердых бытовых, промышленных и медицинских) с применением генераторов плазмы, которая обеспечивает наиболее полное разложение материалов отходов на простые вещества. Плазма выступает в роли источника энергии, то есть генератора высокотемпературных газов – заменителя продуктов сгорания органического топлива [13–15, 133–135, 165–169, 171, 172, 174, 184, 214, 288, 291, 294, 298].

Известные на сегодня плазменные установки характеризуются высокими градиентами параметров в реакционной зоне, обусловленными свойствами плазменных струй. В результате различные объемы материала отходов газифицируются с различной скоростью, а в высокотемпературной зоне могут образовываться новые нежелательные соединения, например, оксиды азота и др.

Мировые тенденции утилизации отходов, направленные на вторичное использование, а не на полное уничтожение, привели к созданию альтернативных систем обработки опасных отходов. В настоящее время существует более сорока таких технологий, производимых более чем семью десятками изготовителей в Соединенных Штатах, Южной Америке, Японии, Китае, и в Индии. Эти системы различаются по мощности и степени автоматизации (рис. 1.1).

Следует отметить, что на решение проблем экологически безопасного обращения с отходами, направлены научные исследования авторов: в Украине – С. В. Петров, В. Н. Коржик, А. В. Чернец, А. С. Науменко, А. Н. Касимов и других; в России – А. М. Гонопольский, М. Н. Бернадинер, А. Н. Братцев, И. М. Бернадинер, Г. С. Маринский, О. Л. Федоров и других, Поиск решений по рациональной, экологически безопасной и экономически выгодной утилизации опасных отходов проведен в работах ученых Беларуси А. Л. Моссэ, В. В. Савчина, А. В. Ложечника и других.

Авторы работы [14] считают наиболее эффективным способом обезвреживания углеродсодержащих отходов, в том числе и медицинских, термический высокотемпературный способ. Под действием высоких температур органические составляющие материалов отходов разлагаются и окисляются до безвредных продуктов горения CO_2 , H_2O , N_2 . Ряд органических составляющих материалов отходов может содержать хлор, фтор, серу, фосфор, при высокотемпературной обработке которых образуются окислы и кислоты HCl , HF , SO_2 , P_2O_5 .

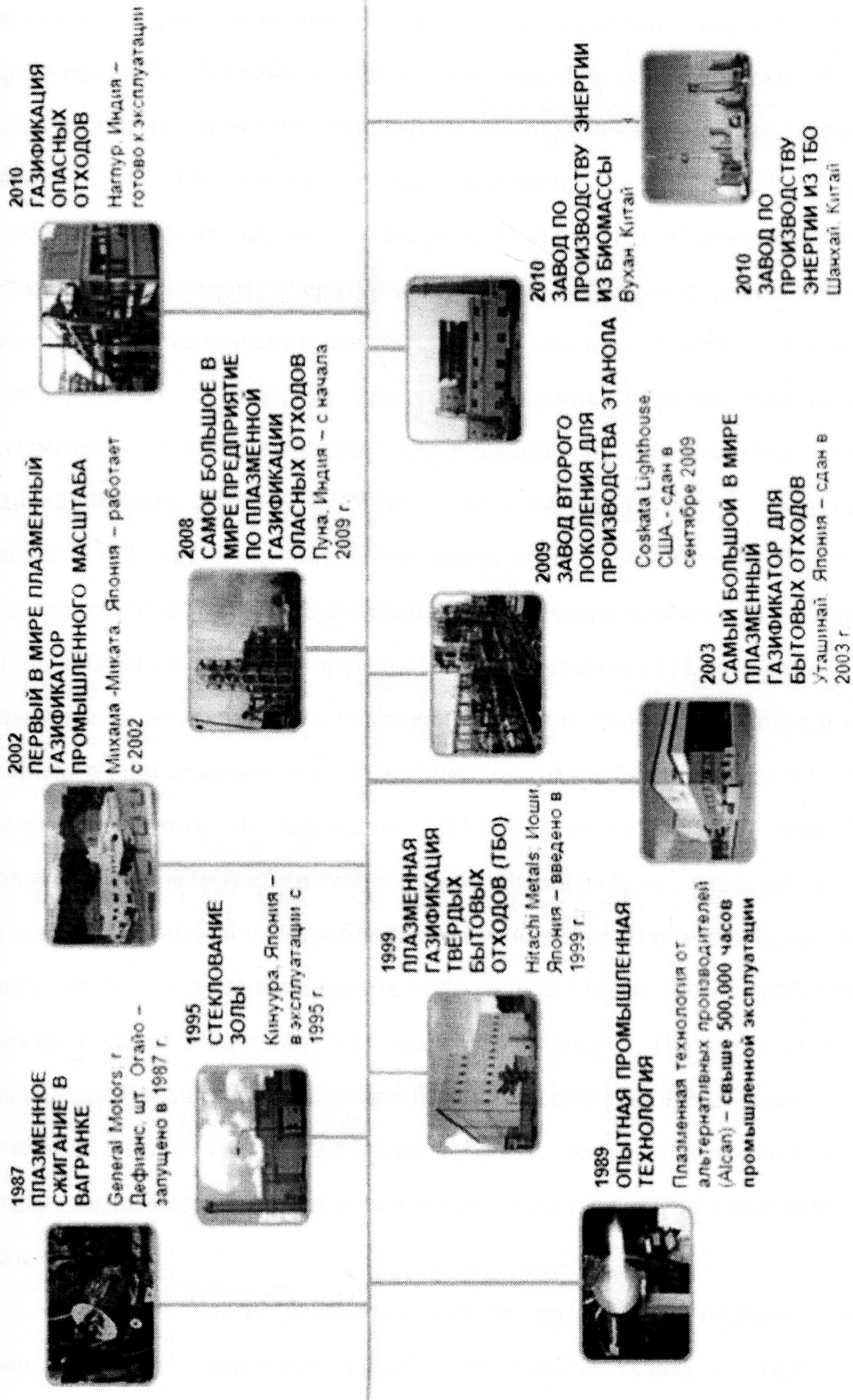


Рис. 1.1 Мировые тенденции утилизации отходов, направленные на их вторичное использование

В исследовании [285] авторы показали процесс формирования диоксинов при термической обработке отходов, научно обосновали эффективность борьбы с ними при оснащении установки утилизации разработанной системой очистки и экспериментально подтвердили это работе [268]. На основе анализа современных технологий переработки отходов, авторами научной работы [14] наиболее эффективным признан термический высокотемпературный способ, так как под действием высоких температур органические составляющие опасных отходов разлагаются и окисляются до безвредных продуктов горения. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки отходов с одновременным обеспечением экологической безопасности представлены в работе [172]. Анализ и обобщение опыта использования генераторов плазмы для высокотемпературной переработки и обезвреживания различных видов отходов показал основные варианты их применения [13]. Несмотря на то, что плазменные технологии на современном этапе хорошо изучены и освоены, широкого применения для утилизации бытовых отходов они не получили. Авторы научного исследования [299] констатируют, что при большом количестве преимуществ плазменной газификации отходов имеется и недостаток – большое потребление энергии генераторами плазмы. При этом предлагается полученный синтез-газ использовать для выработки тепла, электроэнергии или в качестве химического сырья. Перечень действующих плазменных установок представлен в коммерческом предложении [306], из которого видно, что в настоящее время в эксплуатации находятся всего четыре установки, использующие генераторы плазмы, производительностью более 100 т/сут.

Наиболее часто решаются задачи разработки перерабатывающего комплекса для многотоннажной утилизации отходов. При этом не учитывается, что из-за сезонной и суточной неравномерности потребления

энергии, вырабатываемый топливный газ выбрасывается в окружающую природную среду и вносит свой вклад в парниковый эффект.

Проведение процесса газификации при температуре более 1200 °С, которая обеспечивается применением плазменных генераторов, позволяет избежать появления в синтез-газе жидких фракций (смол). Высокая температура процесса обеспечивает разрушение токсичных органических составляющих отходов, и, при наличии в отходах хлорсодержащих примесей, исключает вторичное образование токсичных веществ [173]. Экспериментальные исследования ученых показали, что синтез-газ, полученный при плазменной технологии утилизации, более калорийный, чем при традиционной газификации [307]. Учеными получены параметры паровой газификации в демо-реакторе, при которых генерируется максимально количество синтез-газа [304]. Однако содержание в нем метана недостаточно для получения топливного продукта, который соответствовал бы требованиям нормативных актов, например как моторное топливо.

В настоящее время существуют пиролизные установки для утилизации медицинских отходов – это российская «ЭЧУТО», французская «Мюллер» и «Пеннрам» производства США.

1.4. Анализ источников формирования экологической опасности при переработке и утилизации углеродсодержащих отходов и возможности их устранения

Все виды термической обработки углеродсодержащих отходов способствуют образованию высокотоксичных веществ – диоксинов.

Диоксины – это тривиальное название полихлорпроизводных дибензо[b, e]-1,4-диоксина. Название происходит от сокращенного названия

тетрахлорпроизводного-2,3,7,8-тетрахлордibenzo[b,e]-1,4-диоксина (рис. 1.2 – 1.4); соединения с другими заместителями – галогенидами – также относятся к диоксинам. Диоксины являются кумулятивными ядами и относятся к группе опасных ксенобиотиков.

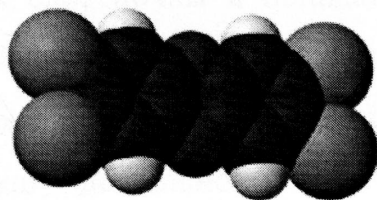


Рис. 1.2. Объемная модель диоксина

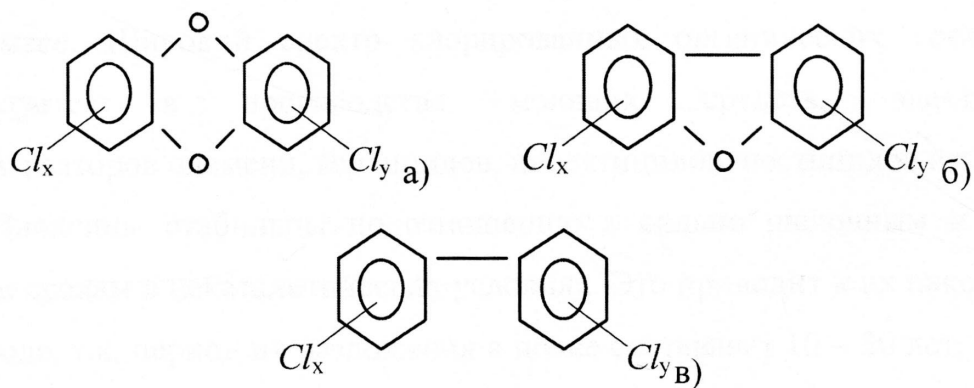


Рис. 1.3. Молекулярная структура диоксинов:

а – дибензо-*p*-диоксины; б – дибензофураны; в – полихлорированные бифенилы

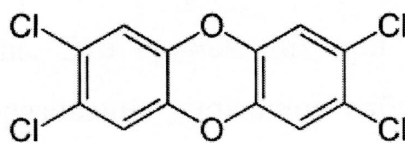


Рис. 1.4. Структурная формула 2,3,7,8-тетрахлордibenzo-пара-диоксина - одного из наиболее токсичных хлорпроизводных дibenzo [b, e]-1,4-диоксина

Диоксины – яд, поскольку даже в относительно малых концентрациях они поражают практически все формы живой материи – от бактерий до теплокровных. По уровню токсичности они превосходят все известные токсины. Они не разлагаются в окружающей среде десятки лет, накапливаются в верхнем слое почвы и попадают в организм человека в основном с пищей, водой и воздухом [218]. Для диоксинов не существует «порога действия»: даже одна молекула способна спровоцировать ненормальную клеточную деятельность и вызвать цепь реакций, нарушающих функции организма. Диоксины образуются всегда в присутствии хлора, органики, кислорода при умеренной температуре (выше 300 °С). В отходах хлор содержится в основном в виде соединений, таких как, поваренная соль и поливинилхлорид, в которых он составляет больше 50 % масс. Широкий спектр хлорированных органических соединений используется в производстве моющих средств, электроники, флегматизаторов пламени, гербицидов, инсектицидов, пестицидов и т. п.

Диоксины стабильны по отношению к сильно щелочным и сильно кислым средам в некаталитических условиях. Это приводит к их накоплению в природе, т.к. период их разложения в почве составляет 10 – 20 лет, а в воде около 2 лет [218].

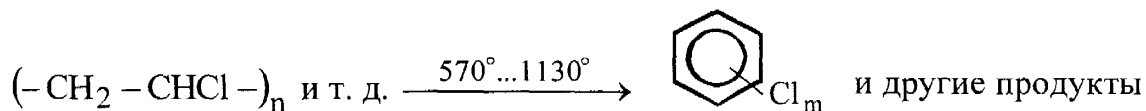
Диоксины обладают высокой термостойкостью. Эффективное разложение этих веществ происходит только при температурах выше 1200 °С и выдержке более 2 с. Их терморазложение при меньших температурах является обратимым процессом [15, 218, 310]. При 300...450 °С они синтезируются вновь. Это происходит при традиционной технологии мусоросжигания, где образование диоксинов наблюдается также на выходе охлажденного газа из котла-утилизатора за счет реакций хлора (HCl, Cl₂, хлорорганических соединений и др.) и органического углерода в присутствии катализаторов (например, меди) [15]. В этом случае количество диоксинов не зависит от содержания хлора или брома в топливе [302].

Известны такие механизмы образования диоксинов при термической переработке отходов [193]. Один состоит в неполном разложении диоксинов, которые образовались ранее и содержатся в окружающей среде; они поступают вместе с отходами, но из-за неполного разрушения при термической переработке снова попадают в атмосферу. Другой – это образование диоксинов в газовой фазе в пламени из углеводородов и хлоридов, таких, как фенол и HCl. Известен подобный этому механизм, когда образование диоксинов происходит на частично сгоревшем твердом топливе в зоне горения. Названным выше «высокотемпературным» механизмам формирования диоксинов противодействуют механизмы разрушения, поскольку диоксины не стабильны при температурах выше 800...850 °С. Существует также механизм повторного формирования диоксинов, или *de novo*, который наблюдается в дымовых газах на частицах летучей золы в диапазоне температур 300...450 °С. При такой температуре, когда конкурирующие процессы разрушения диоксинов протекают очень медленно, может происходить каталитическое формирование диоксинов. К факторам их формирования относятся:

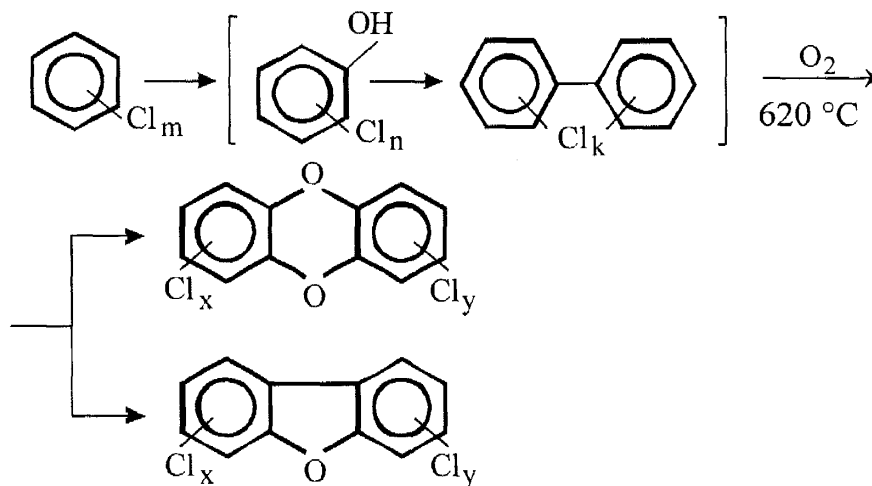
- скорость охлаждения газов в диапазоне температур 300...400 °С и присутствие кислорода;
- наличие частиц летучей золы;
- присутствие следовых количеств Cu и Pb;
- содержание углерода и хлора.

Максимум формирования диоксинов по *de novo* приходится на 400 °С. Большие количества диоксинов образуются при сжигании полимерных отходов, содержащих галогены. Механизм их образования можно представить как двухстадийный процесс (рис. 1.5) [125].

Как видно из рисунка, возможно немало экологически опасных путей образования диоксинов, фактически реализующихся как при производстве продукции, так и при ее утилизации [125].



а



б

Рис. 1.5. Процесс образования диоксинов при утилизации отходов:

а – первая стадия; б – вторая стадия

Существует ряд технологий, которые уменьшают содержание диоксинов при сжигании отходов, однако ни одна из них не дает 100%-ный эффективности. Значительное подавление формирования диоксинов может состоять в деактивации потенциальных участников их образования, таких, как хлор, кислород или катализаторы.

Пиролиз – процесс, при котором элемент разрушается без сгорания под воздействием высокой температуры в бескислородной среде, что препятствует образованию токсичных веществ в газовых выбросах до момента снижения температуры. В результате пиролиза получают сухую золу, которая содержит тяжелые металлы и, следовательно, не пригодны для вторичного использования и требует захоронения. Кроме того, хлорорганические соединения, содержащиеся в твердых остатках пиролиза, приводят к загрязнению окружающей среды диоксинами, фуранами и бифенилами, крайне опасными для здоровья человека и окружающей среды в целом.

Наиболее перспективной в настоящее время является технология переработки отходов с применением плазменных технологий, использующих низкотемпературную плазму в атмосфере обедненной кислородом. Это один из возможных технологических подходов, когда восстановительная среда блокирует формирование диоксинов при утилизации отходов [172].

Главным преимуществом технологии газификации по сравнению с методами прямого сжигания, является низкий уровень воздействия на окружающую среду. Это в первую очередь обусловлено нахождением газообразных продуктов при высоких температурах в обедненной кислородом среде, что приводит к разложению и дехлорированию наиболее опасных веществ - диоксинов, фурана, полихлорбифенилов, бенз[а]пиренов и других полициклических ароматических углеводородов. Также преимуществом газификации является образование гораздо меньших объемов газов, подлежащих очистке, чем при прямом сжигании и существенного (в разы) уменьшения объема зольного остатка. Причем зольный остаток, практически, не содержит углерода, т. е. отсутствует сажа. Что позволяет добиться значительной экономии средств на дорогостоящем оборудовании газоочистки дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу и оборудовании обеззараживания твердых вторичных отходов.

Совокупность процессов, протекающих во время газификации - пиролиз (деструкция), неполное горение, окисление, комбинации и рекомбинации - принято называть термохимической конверсией. Под воздействием плазмы отходы нагреваются до температуры свыше 1200 °С. Такой нагрев вызывает разложение органических молекул в отходах на очень простые молекулы, такие как водород, окись углерода, двуокись углерода, водяной пар и метан. Затем эти простые молекулы в газообразной форме непрерывно выводятся из установки для обработки (охлаждения и очистки) газа, получаемого в плазменном газификаторе. Зола и другие, неорганические материалы, находящиеся в отходах, расплавляются, образуя

сложный жидкий силикат и металлы, которые стекают на дно бака плазменного газификатора [92, 168, 177, 249].

Плазменное дожигание и последующая очистка генераторного газа устраняет предпосылки для повторного образования диоксинов при сжигании. Будучи весьма экологичной и перспективной, технология плазменной газификации отходов еще недостаточно изучена. В настоящее время существует ограниченное количество действующих установок такого типа.

Наибольшее распространение в практике пиролиза и газификации медицинских отходов нашли вертикальные шахтные печи. Классическим примером противоточной шахтной печи для пиролиза твердых отходов является реактор, разработанный ГУП МосНПО «Радон» [167]. Упаковки с отходами поступают через узел загрузки в верхние слои шахты и, опускаясь под действием силы тяжести, нагреваются за счет теплоты газов, движущихся вверх им навстречу. Источником энергии служат дуговые плазмотроны, установленные в подовой части печи над ванной. В качестве плазмообразующего газа используется воздух. Применение воздушных плазмотронов достаточной мощности позволило отказаться от дополнительного топлива. В верхней части печи отходы проходят стадии сушки и пиролиза, сопровождающиеся интенсивным газовыделением. В высокотемпературной зоне шахтной печи в нижних слоях отходов происходит возгонка летучих соединений. В то же время в среднем и верхнем уровнях шахты печи, в зоне относительно низких температур, эти соединения концентрируются и сорбируются в слое отходов. Коксовый остаток в значительной степени выжигается, аминеральные компоненты плавятся и поступают в зону накопления расплава.

Качество синтез-газа зависит от типа подаваемого сырья, температуры, времени пребывания в реакторе и т.п. [60]. Для снижения количества высокомолекулярных конденсирующихся веществ применяют обращенную схему газификации [113].

В этом случае сырье, поступающее в реактор, подвергается термическому разложению в зоне пиролиза и образующиеся летучие вещества проходят через высокотемпературную зону горения восстановительную зону, что обеспечивает высокие времена пребывания (1...2 с) смолистых веществ.

Летучие вещества, выделяющиеся из топлива при его нагревании, подвергаются термоокислительному превращению с образованием широкого круга органических веществ. В зависимости от температуры и времени пребывания летучих веществ в реакторе основными компонентами смолы являются [254]:

1. Продукты первичного превращения целлюлозы и гемицеллюлозы (левоглюкозан, гидроксиацетальдегид, фурфуролы и др.), а так же лигнина — метоксифенолы.

2. Фенольные соединения — продукты превращения соединений первой группы.

3. Алкилпроизводные ароматических веществ: аценафтен, метилнафталин, толуол.

4. Ароматические углеводороды (бензол, нафталин, антрацен с фенантроном и пирен).

Для повышения температуры в реакторе-газификаторе можно применять плазму веществ, участвующих в процессе газификации (воздух, пар).

При этом энергетически оптимально применять именно воздушную плазму [250]. Используя плазму в качестве окислителя, можно значительно повысить запасенную в синтез-газе химическую энергию, а также повысить температуру, снизив содержание побочных продуктов, таких как смолы (конденсирующиеся при нормальных условиях органические вещества).

При плазменной газификации температура синтез-газа, выходящего из реактора может составлять 1250 °С [173] и более, что вызывает практически полное разложение высокомолекулярных органических веществ [260]. Основными компонентами смолы в этом случае являются бензол, толуол и

нафталин, общее содержание которых для топлив с высоким выходом летучих веществ не превышает 10 мг/м^3 [250].

Однако компоненты смол по-разному влияют на устройства, работающие с получаемым синтез-газом. Особенно важна точка росы синтез-газа, зависящая от его состава.

Традиционные методы газификации в зависимости от принимаемой схемы процесса дают от 0,5 до 100 г смол на 1 м^3 синтез-газа [290].

При переработке отходов по технологии плазменной газификации не требуется предварительной сортировки отходов, так же возможна переработка «влажных» отходов.

Таким образом, можно сказать, что существующие технологии переработки отходов с применением генераторов плазмы требуют дополнительных исследований. А, следовательно, актуальными задачами являются развитие и усовершенствование данной технологии по ряду «проблемных» моментов с экологической точки зрения.

Перспективным является поиск новых путей управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов, которые используют технологическое обеспечение, позволяющее получать в процессе утилизации полезный продукт, в энергетического сырья.

Решению задач управления экологической безопасностью с рассмотрением технологического обеспечения управленческих решений и посвящена данная диссертационная работа.

1.5. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка компонентов системы управления экологической безопасностью при обращении с твердыми углеродсодержащими отходами, а также экологически безопасной технологии их утилизации.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- создание методологических основ исследования и разработки эффективных систем управления экологической безопасностью при утилизации отходов;

- анализ современных научных разработок для обеспечения экологической безопасности в процессе утилизации и вторичной переработки твердых углеродсодержащих отходов;

- создание системы обеспечения оперативного выявления мест несанкционированного скопления отходов и их идентификации на основе метода анализа материалов дистанционного зондирования отдельных участков земной поверхности;

- разработка общей модели технологического процесса экологически безопасной утилизации твердых углеродсодержащих отходов;

- разработка технологических устройств и оборудования, обеспечивающих процесс утилизации твердых углеродсодержащих отходов;

- на основе численного моделирования оценка возможности предотвращения образования высокотоксичных веществ при реализации технологического процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов;

- оценка эффективности разработанной технологии утилизации твердых углеродсодержащих отходов по энергетическим и экономическим показателям.

РАЗДЕЛ 2

СОЗДАНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

2.1. Системный подход к разработке экологически безопасного процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов

Существенное негативное влияние на равновесие окружающей природной среды, на экологическую безопасность оказывают чрезмерная концентрация экологически опасных производств, несовершенство технологических процессов, ненадежность технических систем и другие виды деятельности человека. Среди факторов экологической безопасности в большинстве регионов одно из доминирующих положений занимают отходы. Одной из причин появления экологически опасных отходов является научно-технический прогресс в создании новых видов материалов. Эффективное решение проблемы накопления отходов заключается в создании системы управления экологической безопасностью при их утилизации. В этом случае целесообразным является системный подход к разработке организационно-технологических решений утилизации. Системный подход позволяет рационально формулировать и решать сложные проблемы, путем структурирования и выделения их отдельных задач как относительно самостоятельных частей.

Широкое применение системного подхода в решении сложных технических, технологических, экономических и других проблем актуально

на данном этапе развития наук об экологической безопасности. Это обусловлено следующими его преимуществами: он дает возможность рационального формулирования и, главное, решения сложных проблем, которые возможно структурировать с выделением отдельных задач как вполне самостоятельных частей единой системы, при этом возможен учет располагаемых ресурсов.

Подход неоднократно апробирован в практике разработки сложных систем, которые затем успешно внедрены в различные отрасли экономики [239, 248, 308, 309].

Идеология и методология системного анализа и синтеза развиты сегодня в достаточной мере в различных областях научного знания. Однако в области проблематики разработки систем управления экологической безопасностью они на сегодняшний день развиты недостаточно. Отличительные признаки, определяющие системный подход, следующие:

- постановка и формулировка целей и задач;
- разработка общей модели, соответствующей реальному объекту исследования с учетом требований на ограничения;
- декомпозиция модели на компоненты и установление связей между ними;
- разработка алгоритмов и методов анализа и последующего синтеза компонентов.

Как любая сложная система, управление экологической безопасностью состоит из множества компонентов, формирующихся исходя из их функциональных характеристик и взаимоотношений в процессе функционирования системы в целом. Это позволяет представить систему в виде модели, удобной для аналитического исследования и синтезирования компонентов-подсистем собственно системы и внешней среды. Исходной позицией для разработки такой системы предложена дифференциация производственного процесса на характерные этапы.

Каждая из составляющих системы управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов является весьма сложной и большой целевой подсистемой, характеризующейся определенными функциями, методами и средствами их практической реализации.

Главными элементами системы управления являются предотвращение (существенное ограничение) негативного влияния на окружающую природную среду, ослабление последствий проявления опасности, ослабление интенсивности действия источников опасности. При этом первоочередными управленческими техническими решениями являются использование схем совместной переработки твердых углеродсодержащих отходов разных хозяйственных комплексов.

Итак, следует отметить, что для решения поставленных практических задач, поставленных в конкретном научном исследовании и достижения тем самым его цели, возможно и приемлемо с принятием системного подхода в качестве методологической основы. В частности, это в полной мере относится к управлению экологической безопасностью процессов утилизации твердых углеродсодержащих отходов.

2.2. Компоненты системы управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов

Управление экологической безопасностью – это динамический процесс, который развивается и совершенствуется благодаря тесной связи и во взаимодействии с научно-исследовательской, конструкторско-технологической и организационно технической подготовкой к управлению этим процессом.

Все составляющие системы управления экологической безопасностью представляют собой сложные и объемные целевые подсистемы, которые

характеризуются вполне определенными функциями, методами и средствами их практической реализации и, как и вся система, имеют тенденции к развитию и совершенствованию.

Анализ результатов исследования всех аспектов проблемы управления экологической безопасностью позволяют сделать вывод о том, что процесс, ей соответствующий, следует рассматривать сложную систему технологического процесса утилизации (СТПУ) отходов. При этом выделяют следующие аспекты этой проблематики: ее структура и функции, многообразие таких систем, средства реализации технологических процессов управления и соответствующих им исполнителей, форма организации таких процессов, связи между вышеприведенными аспектами в виде определенных взаимоотношений и противоречивого взаимодействия.

Любая сложная система состоит из множества компонентов, которые формируются в процессе функционирования системы, как единого целого, исходя из их характеристик и взаимоотношений. При этом управление экологической безопасностью не является исключением. Исходя из последнего, становится возможным представление этой системы в виде модели, удобной для анализа и синтезирования компонентов-подсистем собственно системы и внешней среды (рис. 2.1).

Структура собственно системы управления экологической безопасностью может быть представлена как набор функционально связанных процессов определения пространственных и временных показателей системы утилизации твердых углеродсодержащих отходов, управления процессами специального технологического оснащения и оборудования. Обязательным также является включение в этот набор обеспечивающих компонентов внутри самой системы, а именно: организацию выполнения технологических процессов управления экологической безопасностью и получение заданных планово-экономических показателей.

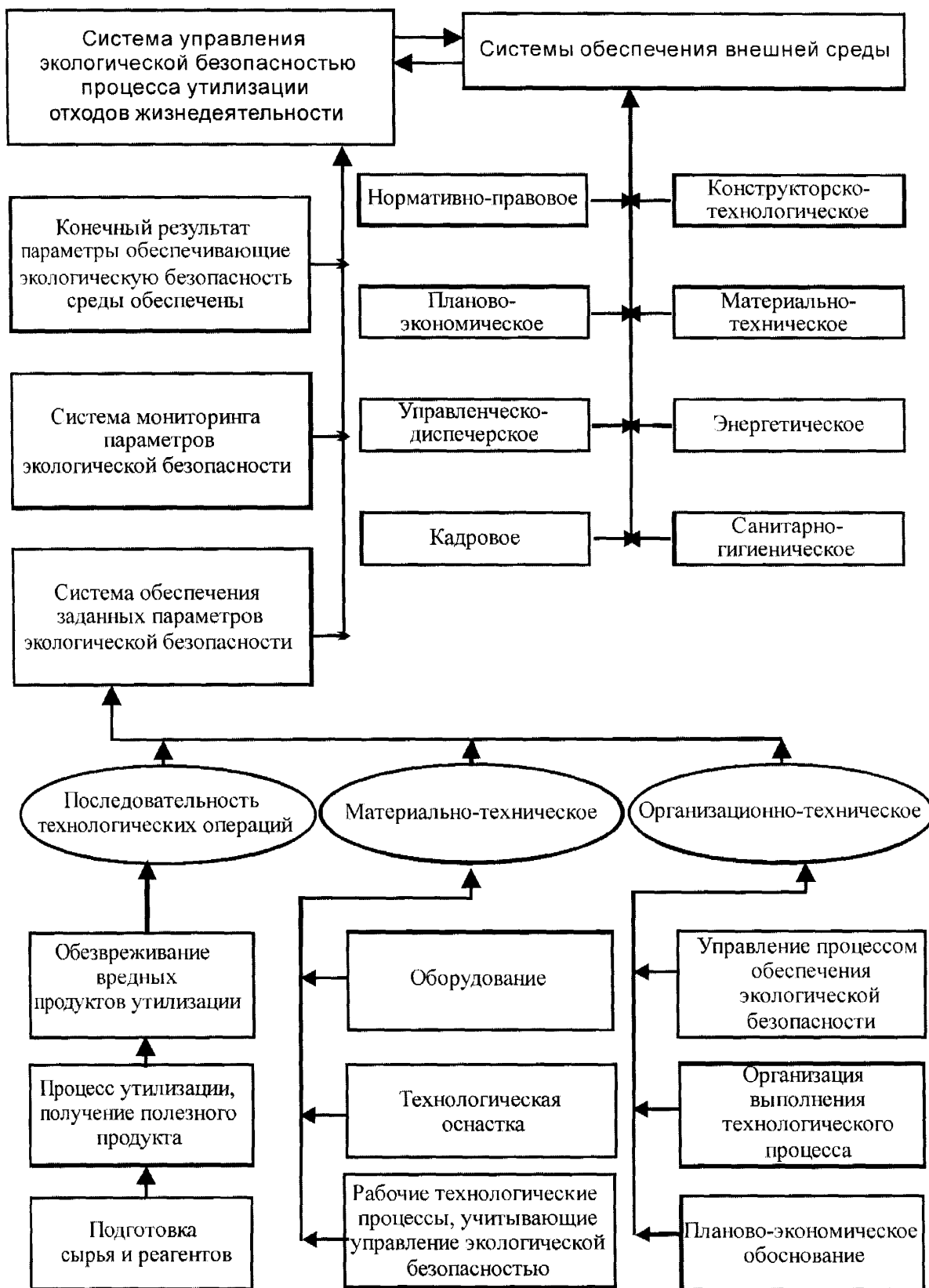


Рис. 2.1. Структура системы управления экологической безопасностью, технологического процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов

Комплекс внешних компонентов, со своей стороны, обеспечивает и поддерживает в нормальном функциональном состоянии систему управления экологической безопасностью. Он состоит из совокупности следующих подсистем:

- обеспечивающая конструкторской и разрабатывающая технологическую документацию;
- обеспечивающая технологической оснасткой и оборудованием;
- поставляющая исполнителей надлежащего качества и количества;
- обеспечивающая заданный уровень санитарно-гигиенических норм на производственных участках;
- обеспечивающая энергетическое и материальное снабжение;
- поддерживающая оборудование и технологическое оснащение в рабочем состоянии;
- обеспечивающая планирование и управление экологической безопасностью.

Анализ различных подходов к детерминации понятия «система» выходит за рамки данного исследования. В случае рассматриваемого объекта исследования принимаем следующее его общее определение: это любое упорядоченное определенным образом множество объектов (или их элементов), связанных взаимными отношениями, обладающее целостностью. При этом особое внимание стоит уделить именно целостности, как фундаментальнейшему свойству системы, под которым будем подразумевать недостаточность, в подавляющем большинстве случаев, определенности свойств отдельных компонентов системы для определения свойств системы в целом. Однако, только полный набор компонентов определяет конкретный вид системы и добавление, удаление или изменение даже одного из них приводит как к изменению свойств всей системы, так и к изменению характера взаимодействия остальных ее компонентов.

Основную цель функционирования рассматриваемой СТПУ можно сформулировать как управление процессом утилизации продуктов жизнедеятельности для достижения установленных показателей экологической безопасности с минимальными затратами трудовых и материальных ресурсов. Ее достижение возможно только всей совокупностью вышеописанных компонентов как основной системы, так и систем обеспечения внешней среды. Любые изменения (например, изменение номенклатуры оборудования, оснащения и т. д., используемого в процессе управления экологической безопасностью) приводят к изменению как количественных, так и качественных показателей состояния окружающей природной среды, а также себестоимости обеспечения экологической безопасности. Таким образом, такие изменения оказывают существенные (в количественном плане) и принципиальные (в качественном плане) изменения на конечный продукт системы, построенной и функционирующей ради его получения.

Структуру системы СТПУ образуют вышеописанные компоненты в их взаимосвязи. Ее удобно представлять в виде схемы иерархических уровней компонентов системы. На фоне общей системы любой степени сложности, то есть высшей ступени иерархии, для ее аналитического исследования целесообразно и методологически приемлемо выделить компоненты-подсистемы в качестве относительно самостоятельных частей общей системы. Организационно-технологическая система СТПУ управления экологической безопасностью не является исключением. Степень детализации при этом и, соответственно, количество иерархических уровней общей системы, определяется исследователем, исходя из реальных ожидаемых практических задач и экономического эффекта. В иерархической структуре системы связи между компонентами-подсистемами устанавливаются по принципу подчинения или согласования, что и является сутью понятия иерархических систем. При этом в первом случае один из двух взаимосвязанных компонентов является определяющим в их

совместном функционировании, а во втором – взаимосвязанные компоненты равноценны и стоят на одном иерархическом уровне.

Вышеописанный иерархический подход к построению структуры модели СТПУ управления экологической безопасностью, как равно и к установлению структурных связей между ее компонентами, например, проявляется в следующем: невозможно разработать и изготовить технологическое оснащение или определить номенклатуру необходимого оборудования, не разработав предварительно технологические процессы управления экологической безопасностью. Изменение в технологическом процессе (например, переход на другой способ утилизации отходов) приводит к изменению как номенклатуры и конструкции оснащения, так и номенклатуры необходимого оборудования.

Однако, между компонентами «технологические процессы» и «организация выполнения технологических процессов» также может быть установлена связь согласования.

Совокупность взаимосвязанных частей, выделяющаяся в качестве обособленной системы из внешней среды, создает с множеством не вошедших в систему объектов, образующим внешнюю для системы среду, пару взаимодействующих и взаимовлияющих согласованных структур.

Формулировки целей и задач исследования непосредственно определяют методологические подходы к выделению из внешней среды обособленной системы, позволяющие относить те или иные компоненты-подсистемы внешней среды к основной системе. Однако система при этом должна обладать свойствами конечности и принципиальной практической реализуемости в оптимальные сроки и с рациональными затратами потребных ресурсов на ее создание.

Таким образом, компоненты из общей системы СТПУ, которые существенным образом влияют на рационализацию этапов подготовки к управлению экологической безопасностью (конструкторского, технологического и организационного) и собственно управление

экологической безопасностью (работа с оборудованием, утилизация отходов и т. д.), выделены в полном соответствии с поставленной целью научного исследования и задачами, решаемыми для ее достижения.

2.3 Формализация решения задачи управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов

Используя принцип многоуровневой декомпозиции [191], переходим к формализации решения задачи рационального управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов. Процесс проектирования системы обусловлен разбиением на иерархические уровни функционально завершенных этапов решения комплекса подзадач данного уровня (рис. 2.2).

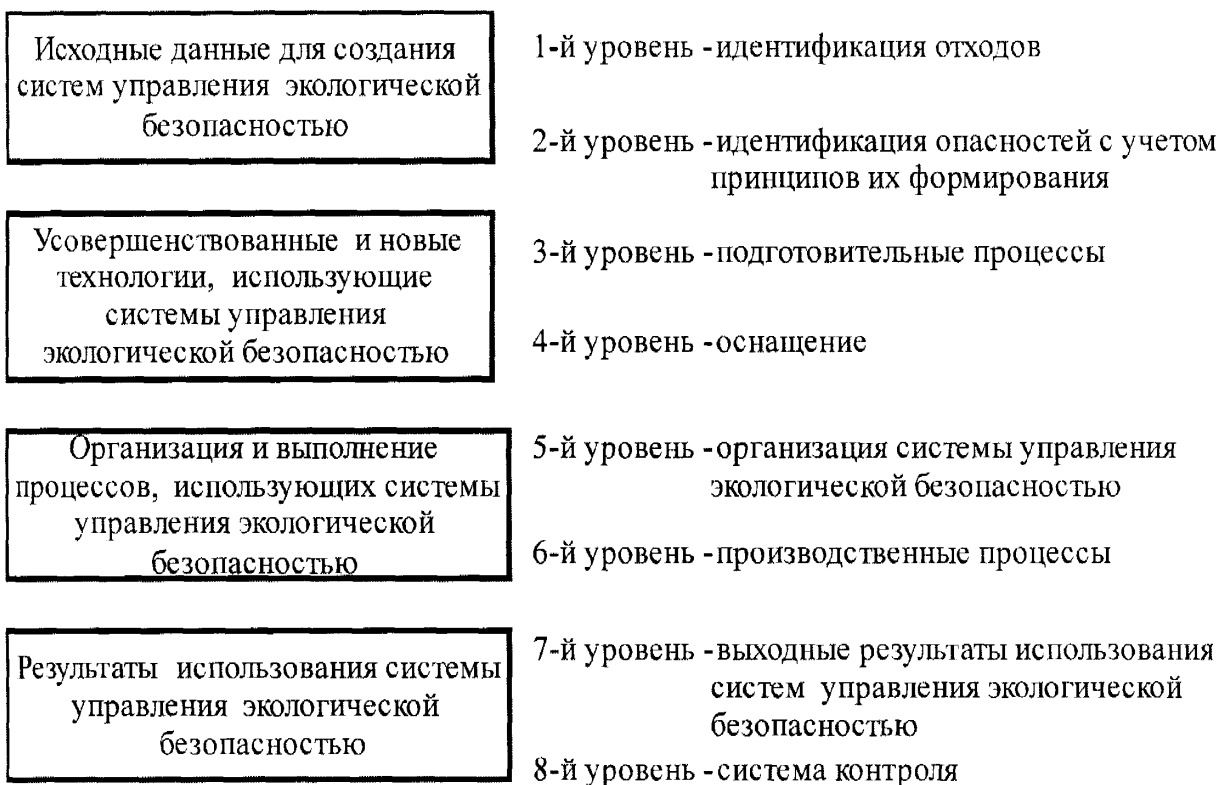


Рис. 2.2. Укрупненная схема многоуровневой декомпозиции

Формирование исходных данных (рис. 2.3) включает в себя два уровня, определяющих идентификацию отходов и составляющих опасности. На первом уровне определяются типы отходов для технологического процесса утилизации. При этом особо выделяем группы, характеризующие образование высокотоксичных веществ. Второй уровень предполагает определение и идентификацию составляющих опасности с учетом характерных особенностей региона (каждый регион отличается своими приоритетами и иерархией структур накопления отходов), пространственно-временную структуризацию опасности (совокупность экологически опасных отходов любого генезиса, которые вследствие взаимодействия и взаимного влияния формируют опасность); количественная структуризация (предполагает наличие по типам отходов). Этот уровень завершается разработкой вариантов принципиальных технологических схем утилизации с учетом обеспечения экологической безопасности.



Рис. 2.3. Схема этапа формирования исходных данных

Этап анализа новых и усовершенствованных технологий, так же как и предыдущий, состоит из двух последовательных уровней (рис. 2.4). Третий уровень охватывает подготовительные процессы по созданию технологической системы утилизации с учетом требований экологической безопасности. Он

включает в себя технологический процесс термической обработки отходов, пиролиз; создание необходимого термохимического процесса, предотвращающего образование высокотоксичных веществ, и процесс, препятствующий в дальнейшем возможным образованиям высокотоксичных соединений.

На четвертом уровне вырабатываются технические условия, и разрабатывается оснащение, необходимое для безопасной утилизации. Суть предлагаемых мероприятий состоит в обеспечении технологических процессов основным, вспомогательным и дополнительным оборудованием с учетом безопасной работы персонала. Для этого уровня характерным является учет объемов, номенклатуры производственных процессов и сроков исполнения.

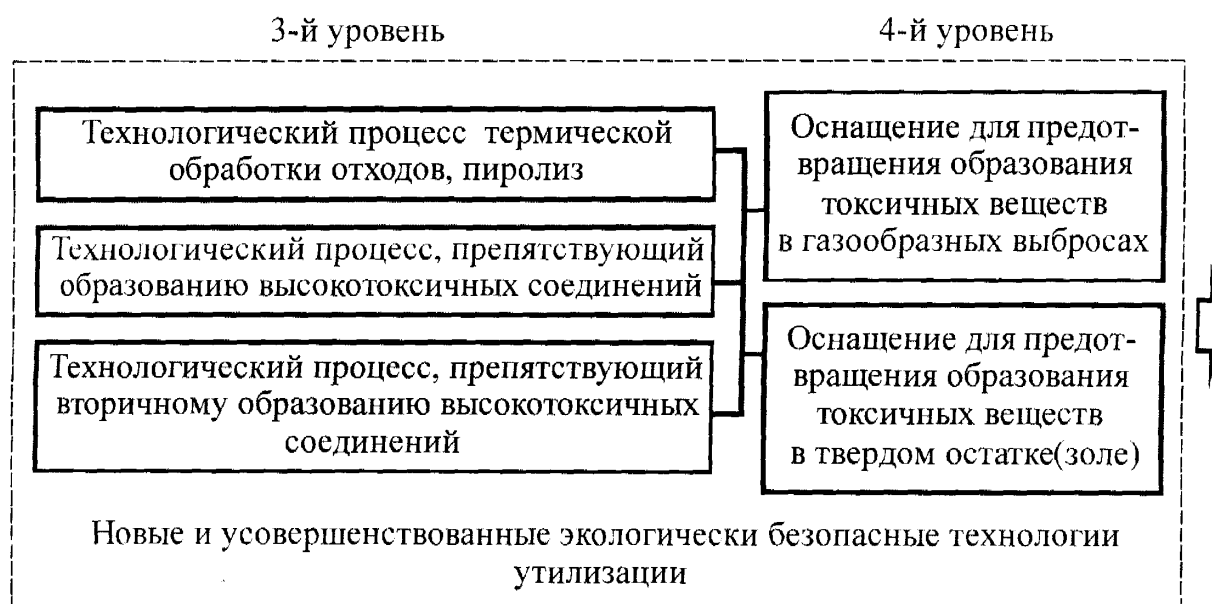


Рис. 2.4. Схема этапа анализа новых и усовершенствованных технологий

Непосредственная реализация процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов представлена третьим этапом (рис. 2.5). Здесь пятый уровень характеризуется решением задач организации технологического процесса управления им. Комплексное решение задач этого уровня необходимо выполнять совместно с решением задачи шестого (производственного) уровня,

задачи которого реализуются с учетом обеспечения экологической безопасности, технологических и производственных процессов.

Заключительным этапом является контроль результатов использования системы управления экологической безопасностью (рис. 2.6). Седьмой уровень предполагает на основе реализованного процесса утилизации достижение выходных параметров обеспечения экологической безопасности: снижение объемов накопления отходов на промышленных предприятиях и полигонах, получение продукции целевого назначения (например, топливного газа или моторного топлива).

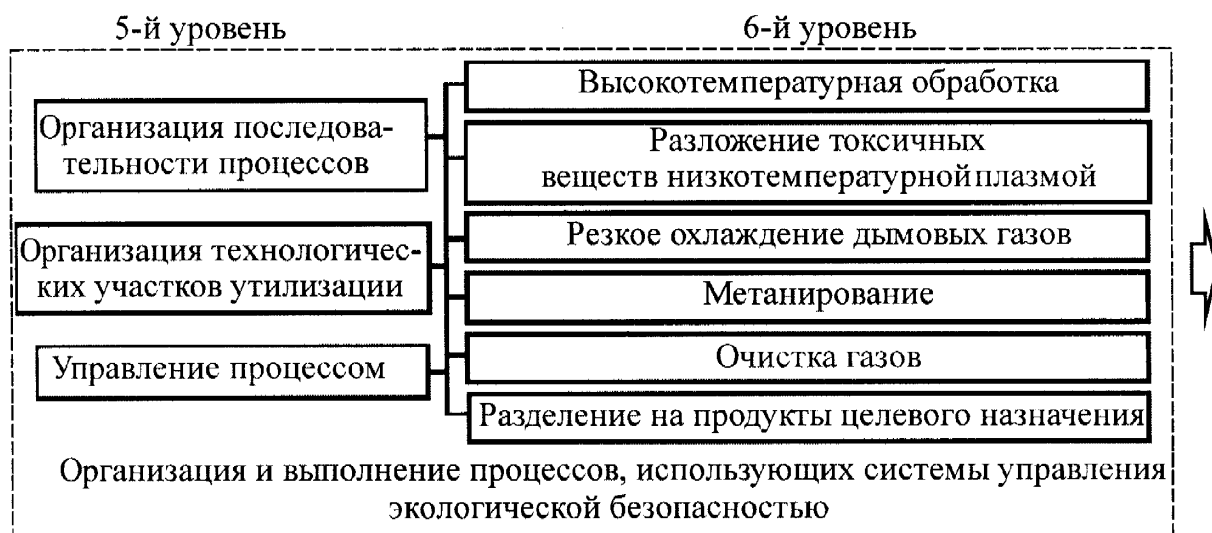


Рис. 2.5. Схема этапа организации и выполнения технологий

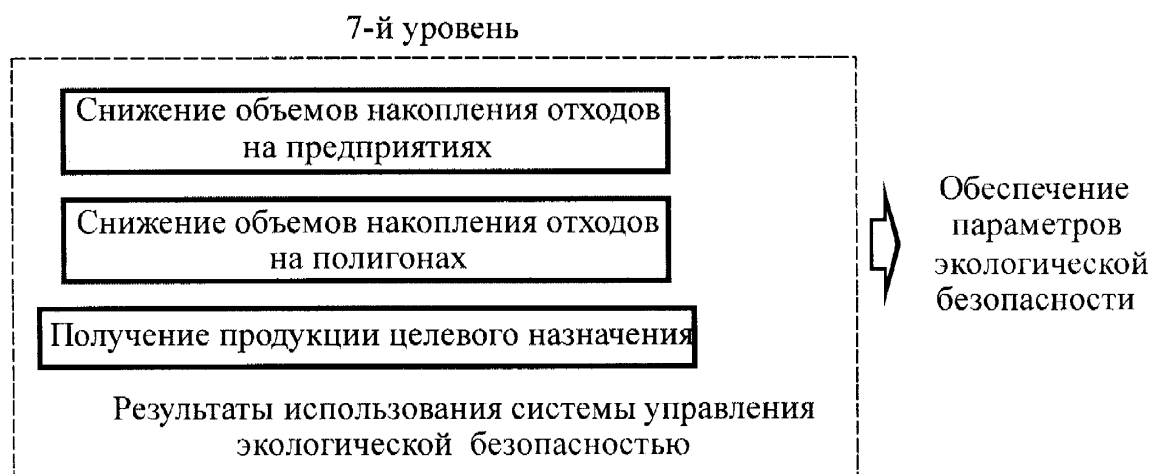


Рис. 2.6. Схема этапа обеспечения параметров экологической безопасности

Строго учитывая основные принципы многоуровневой декомпозиции, предложенная иерархическая структура предполагает формализацию решения поставленной задачи. При этом присутствует:

- наличие вертикальных и горизонтальных связей межуровневые и этапные;
- приоритетность действия уровней и этапов сверху донизу;
- взаимозависимость уровней;
- вариантность выбора и решения задач каждого уровня.

2.4. Функции технологической системы утилизации отходов и ее компоненты

Известно, что основой существования любой системы является базис и наличие конкретной цели функционирования. Следует полагать, что отдельно взятые составляющие системы выполняют свои функции, подчиняя свои действия конечной цели. При этом все компоненты системы находятся в определенных взаимосвязях и согласованности в действиях. В данном случае функция заключается в создании процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов с учетом экологической безопасности. Форму указанной функции формализованно представляем в виде трех компонентов:

$$F = (A, B, C), \quad (2.1)$$

где А – действие системы (компонента), приводящее к необходимому результату; В – объект, на который направлено действие; С – особые условия и ограничения, при которых выполняется действие системы (компонентов).

Выражение (2.1) в рассматриваемом нами случае утилизации отходов

имеет следующий смысл: F (система обеспечения экологической безопасности) = [экологическая безопасность (А) в процессе функционирования технологического процесса утилизации (В) при рациональных организационно-технических параметрах с применением усовершенствованных технологий обеспечения безопасности (С)].

Общий подход предполагает, что каждый компонент системы (компонент – подсистема, компонент – элемент) также определяется своей функцией. Функции компонентов системы зависят от собственных свойств компонента, его связей с другими компонентами. Для формулировки основных функций компонентов системы воспользуемся предложенной выше укрупненной многоуровневой схемой (см. рис. 2.2) и ее отдельных уровней (см. рис. 2.3 – 2.6).

На первом уровне в подсистемах выделяем опасные отходы по типу образования и идентифицируем их с учетом возможного образования высокотоксичных веществ в процессе утилизации.

Учитывая основные закономерности формирования экологической опасности в подсистемах второго уровня (см. рис. 2.3), принимаем следующее: F^2_1 (регионализация опасностей) = [в результате анализа промышленно-социальных особенностей региона (А) выделяются приоритеты структур опасностей (В) в зависимости от возможного развития опасности (С)]; F^2_2 (пространственно-временная структуризация опасности) = [в результате анализа экологически опасных объектов любого генезиса, которые вследствие взаимодействия и взаимного влияния формируют опасность (А), позиционируют источники опасности (В), учитывая пространственное расположение источников опасности по отношению к различным объектам и характер среды, в которой эта опасность распространяется (С)]; F^2_3 (количественная структуризация источников опасности) = [в результате анализа различных вариантов принципиальных схем утилизации отходов (А) они классифицируются с учетом

располагаемых ресурсов (В) и их разновидностей (С)].

Функции подсистемы третьего уровня (см. рис. 2.4): F^3_1 – (технологический процесс термической обработки) = [выбор технологических процессов (А), создающих термодинамические условия (В) разложение отходов на молекулярные составляющие (С)]; F^3_2 – (технологический процесс, препятствующий образованию высокотоксичных соединений, пиролиз) = [выбор технологий (А) для создания процесса пиролиза (В) и организация его в области (С) образования высокотоксичных соединений]; F^3_3 – (технологический процесс, препятствующий вторичному образованию высокотоксичных соединений) = [выбор варианта (А) создания и транспортировки многофазных дисперсных структур для резкого охлаждения дымовых газов (В), предотвращающего образование высокотоксичных соединений (С)].

Для подсистем четвертого уровня (рис. 2.4) имеем функции: F^4_1 (оснащение для предотвращения образования токсичных веществ в атмосфере) = [проектирование, изготовление и подбор (А) оснащения (В), обеспечивающего экологически безопасную утилизацию отходов без образования токсичных газообразных компонентов (С), с минимальными затратами на оснащение]; F^4_2 (оснащение для предотвращения образования токсичных веществ в твердом остатке) = [проектирование, изготовление и подбор (А) оснащения (В), обеспечивающего наиболее полное сгорание отходов (С), с минимальными затратами на оснащение].

В подсистемах пятого уровня (рис. 2.5) определены следующие функции: F^5_1 (организация последовательности процесса) = [разработка (А) цикловых графиков (В) формирования термической утилизации, обеспечивающей минимальные затраты ресурсов обеспечения производственной и экологической безопасности (С)]; F^5_2 (организация участков выполнения технологических процессов) = [проектирование и организация (А) участков для реализации технологических процессов

экологически безопасной утилизации (В) с учетом особенностей новых и усовершенствованных технологий (С)]; F_3^5 (управление процессом) = [регулирование и сетевое планирование по времени (А) цикловых графиков использования технологических процессов экологически безопасной утилизации (В) в целях выполнения заданных производственных циклов (С)].

Основные закономерности шестого уровня (рис. 2.5) можно описать следующими функциями: F61 (технологический процесс высокотемпературной обработки отходов) = [регулирование и планирование по времени (А) цикловых графиков производственных процессов сжигания отходов (В) в целях выполнения заданных циклов производственных процессов (С)]; F62 (технологический процесс разложения токсичных веществ) = [регулирование и планирование по времени (А) процесса разложения высокотоксичных веществ низкотемпературной плазмой (В) в целях выполнения поставленной задачи (С)]; F63 (технологический процесс охлаждение дымовых газов) = [регулирование и сетевое планирование по времени (А) процесса охлаждения дымовых газов с помощью многофазных дисперсных структур (В) в целях выполнения поставленной задачи (С)]; F64 (метанирование) = [регулирование и планирование по времени (А) процесса метанирования (В) в целях выполнения поставленной задачи (С)]; F65 (очистка технологических газов) = [регулирование и планирование по времени (А) процесса очистки технологических газов (В) в целях выполнения заданной задачи (С)]; F65 (разделение технологических газов) = [регулирование и планирование по времени (А) процесса разделения технологических газов (В) в целях выполнения заданной задачи (С)].

Функциональные закономерности подсистем седьмого уровня (рис. 2.6) укладываются в общие закономерности для процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов с учетом экологической безопасности.

2.5. Системный подход как условие повышения эффективности систем управления экологической безопасностью процессов утилизации

Рациональное осуществление процесса управления экологической безопасностью в больших и сложных системах, задачи которого должны найти решение, но только при выполнении следующих условий:

1. Поиск или создание корректной модели объекта рационализации, адекватной реальному объекту и удобной для математической обработки.

2. Область определения или существования модели в виде всевозможных ограничений должны быть соответственно задана и учтены.

3. Критерии рационализации, являющиеся правилами выбора предпочтительного варианта решения задач, должны быть установлены.

В теории систем, как показано в многочисленных исследованиях, описание модели системы U осуществляется абстрактным представлением в виде множеств входных T_0 и выходных T_K параметров, которые взаимодействуют и преобразуются с помощью объективных отношений S между ними и их свойствами:

$$U = (T_0, S, T_K). \quad (2.2)$$

При описании процессов, в научных исследованиях могут быть использованы различные формы представления моделей – аналитические, графоаналитические, лексикографические. В целом, это зависит от особенностей рассматриваемых и решаемых задач рациональной организации процессов утилизации твердых углеродсодержащих отходов.

Рациональная организация процессов утилизации твердых углеродсодержащих отходов с использованием моделей, в вышеприведенном понимании этого термина, в данном исследовании будет рассматриваться как метод отыскания рационального решения для реальной системы без непосредственного эксперимента с самой системой. При этом под

корректностью модели рациональной организации процессов утилизации твердых углеродсодержащих отходов, обеспечивающих минимальные затраты ресурсов при обеспечении производственной и экологической безопасности, будет пониматься такая модель, при формировании которой будут учитываться только важнейшие характеристики системы, не перегружая ее менее существенными. Но при этом частично теряется степень адекватности модели реально существующей системе.

Для проверки степени адекватности модели, построенной предлагаемым методом, используется сопоставление результатов, полученных на модели и в реальной системе. Таким образом, соблюдается общее для естественных наук правило, что теоретические результаты исследований должны быть проверены экспериментом или практикой использования их в реальных производственных условиях.

2.6 Формирование концепции создания модели управления экологической безопасностью процессов утилизации твердых углеродсодержащих отходов

Техническая подготовка к реализации процессов управления экологической безопасностью и процесс утилизации отходов – это единая система, направленная на создание системы управления экологической безопасностью. В этом процессе, исходя из анализа имеющейся нормативной и технологической документации и данных проведенных экспериментальных исследований, следует выполнить пространственно-временное структурирование опасности, а именно ее количественных показателей. Также необходимо принять схемы реализации систем управления экологической безопасностью. И только на основании этих материалов выполняют основные мероприятия технологической подготовки, а именно:

– разработка технологических процессов утилизации твердых

углеродсодержащих отходов,

– проектирование и изготовление средств оснащения для проведения этих процессов,

– определение формы организации выполнения технологических процессов, обеспечивающих экологическую безопасность,

– собственно организация производственного процесса.

Таким образом, компоновка интересующей нас интегрированной модели процессов управления экологической безопасностью, отражающая многообразие факторов, влияющих на содержание работ по обеспечению экологической безопасности, возможна только при условии ее декомпозиции и разработки относительно самостоятельных моделей отдельных комплексов подготовки к обеспечению экологической безопасности. На рис. 2.7 показана принципиальная схема формирования интегрированной модели создания системы управления экологической безопасностью.

Ввиду очевидной необходимости в значительной затрате времени и средств для подготовка к реализации экологически безопасных технологий, следует констатировать тот факт, что на практике экспериментальная проверка различных вариантов для решения отдельных задач разработки системы управления экологической безопасностью невозможна.

В таких условиях единственным и достаточно эффективным способом решения задачи с помощью вычислительной техники с минимальными затратами и приемлемой точностью, является моделирование и определение рациональности принимаемых решений.

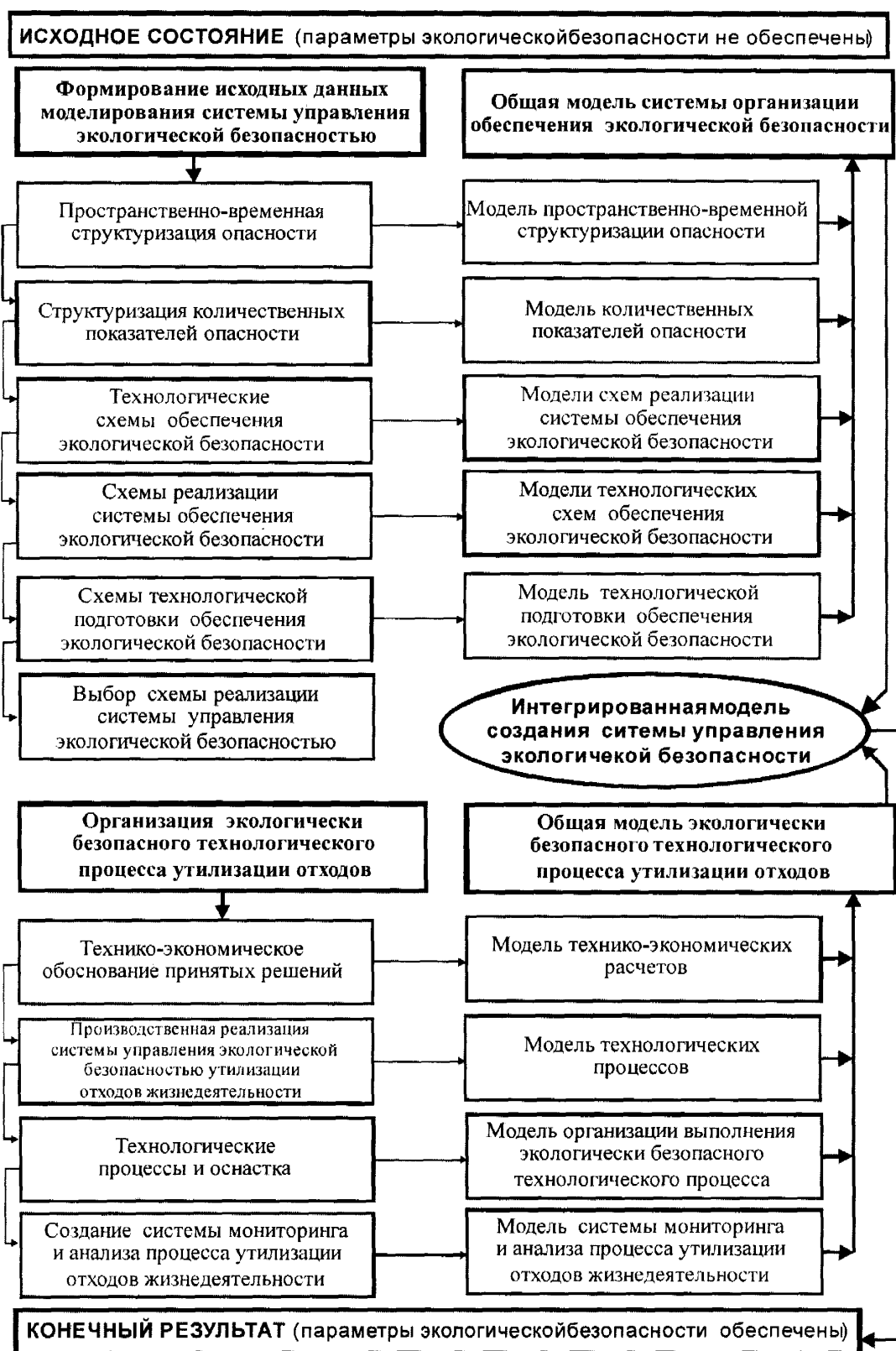


Рис. 2.7. Схема формирования интегрированной модели системы управления экологической безопасностью утилизации твердых углеродсодержащих отходов

2.7. Методологическая схема решения поставленных задач исследования

Изложенные выше положения системного подхода к решению сложных проблем, а также специфических особенностей создания системы управления экологической безопасностью легли в основу данного научного исследования, одним из основных результатов которого является разработанная и практически реализованная следующая схема (рис. 2.8) решения задач:

1. Постановка задач и анализ информации, касающейся отдельных аспектов этих задач для окончательной формулировки задач исследования.
2. Разработка моделей в различных формах представления, удобных для восприятия и понимания, а именно: описательной, математической, в виде научной графики, таблиц и др.
3. Выбор критериев эффективности (или критериев принятия решений) для осуществления процесса рационализации исследуемых систем управления экологической безопасностью.
4. Разработка методов и средств для решения поставленных задач, например, разработка вычислительных алгоритмов и программ для реализации их с помощью вычислительной техники, как наиболее эффективных в условиях отсутствия возможности экспериментальной проверки результатов моделирования во всей полноте постановки задачи.
5. Экспериментальные исследования наиболее важных (то есть, близких к искомому рациональному решению) теоретических разработок, включая проверку их в производственных условиях.
6. Разработка практических рекомендаций и нормативно-технической документации для коммерческого использования предложенных и исследованных методов и средств, а также оптимизационных моделей систем управления экологической безопасностью, в том числе, внедрение теоретических наработок в учебный процесс.

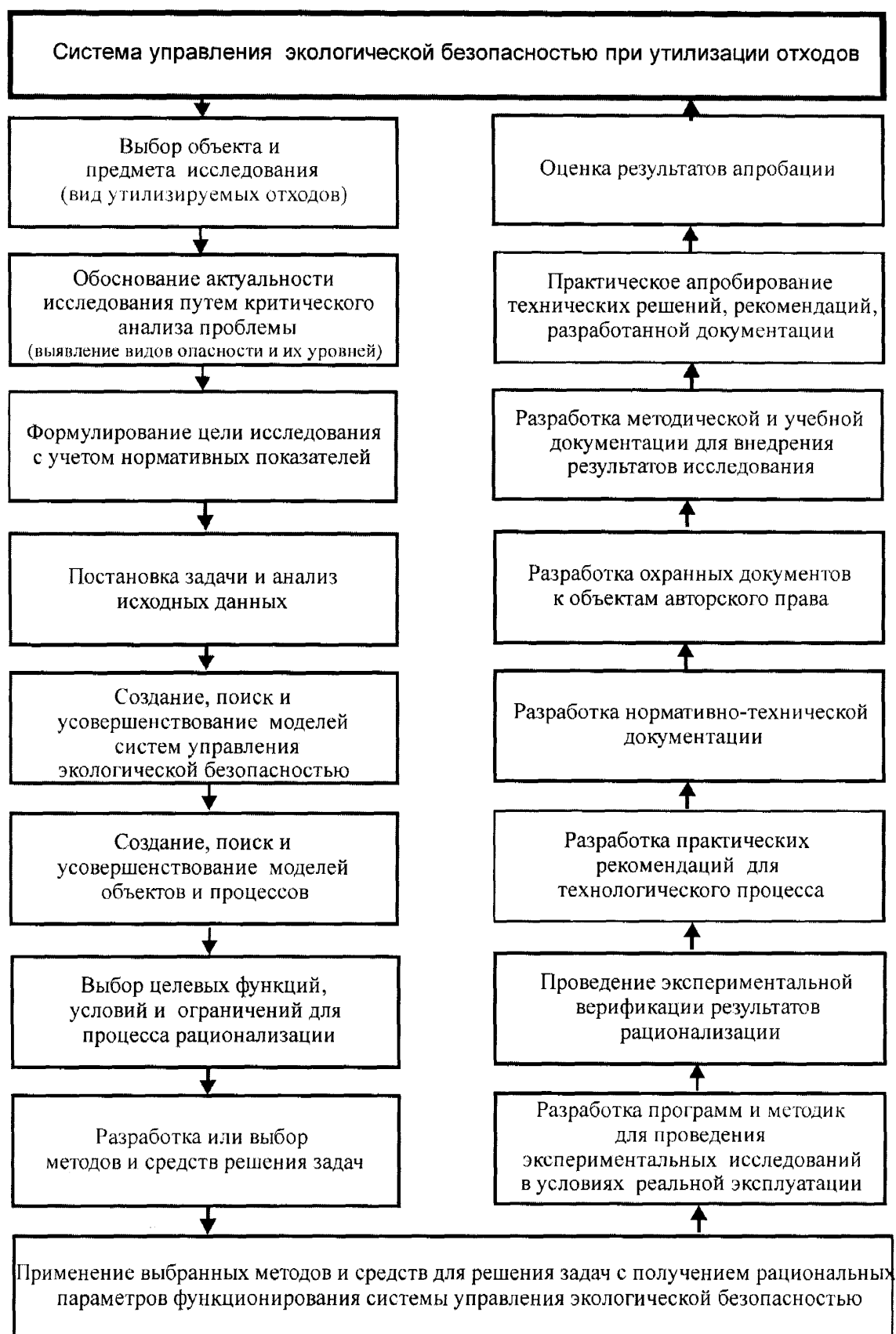


Рис. 2.8. Схема решения задач создания системы управления экологической безопасностью

2.8. Выводы по разделу

1. На основе принципа многоуровневой декомпозиции формализована задача рационального управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов, описаны функции технологической системы утилизации.

2. Представленный в работе подход к построению иерархической структуры системы управления экологической безопасностью позволяет выдержать основные принципы многоуровневой декомпозиции. При этом присутствуют вертикальные и горизонтальные связи между уровнями и этапами; обеспечивается приоритетность их действия сверху вниз; существует взаимозависимость уровней и вариантность выбора и решения задач каждого уровня.

3. С учетом положений системного подхода к решению сложных проблем, а также специфических особенностей создания системы управления экологической безопасностью при утилизации твердых углеродсодержащих отходов предложена методология решения задачи управления экологической безопасностью с учетом получения продукции целевого назначения.

4. Разработан методологический подход к созданию эффективных экологически безопасных технологий утилизации твердых углеродсодержащих отходов и средств ее реализации. Предложены методологические аспекты управления экологической безопасностью при обращении с твердыми углеродсодержащими отходами с возможностью получения продукции целевого назначения.

РАЗДЕЛ 3

ДИСТАНЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Одним из наиболее важных направлений государственной политики в сфере обращения с отходами является обеспечение полного сбора отходов для своевременного их обезвреживания и удаления с соблюдением правил экологической безопасности. Эффективное решение проблемы негативного влияния отходов на компоненты окружающей природной среды заключается в создании системы управления экологической безопасностью при их утилизации. Исходными данными для ее создания является идентификация опасностей с учетом принципов их формирования.

На сегодняшний день в стране существует огромное количество населенных пунктов (особенно в сельской местности), где образуются несанкционированные свалки, ввиду безответственного отношения жителей к проблеме нелегального скопления отходов и отсутствия средств для их ликвидации. Под свалкой мы понимаем место стихийного или спонтанного скопления отходов, количество которых, как правило, не велико. В отличие от полигона, места удаления отходов, и санитарного полигона, спроектированного, построенного и эксплуатируемого в соответствии с экологическими нормами, которые используются официально и об их существовании хорошо известно, места свалок не известны и не предсказуемы.

Как правило, обнаружение подобных мест скопления отходов происходит случайно либо при специальном обходе (объезде) определенной территории [4, 21, 22], что делает наземный контроль и выявление свалок очень затратными по финансам, времени и человеческим ресурсам.

3.1. Обоснование выбора способа обнаружения источников формирования экологической опасности техногенного характера

На заброшенных, неправильно спроектированных и неуправляемых свалках отходов, как правило, накапливаются бытовой мусор, пищевые отходы, отходы автотранспорта, строительные отходы, упаковочный материал, бытовая техника или ее части и многое другое. Кроме того на свалках нередко встречаются опасные отходы, например лекарственные средства и медицинские отходы (рис. 3.1).

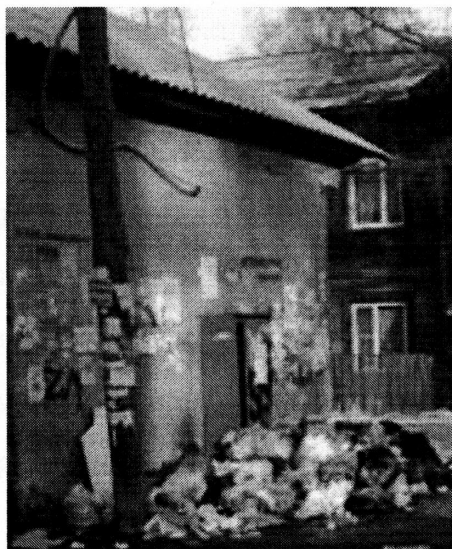


Рис. 3.1. Вид несанкционированных свалок

При этом отходы, в зависимости от возможностей их разложения в условиях свалки, приводят к образованию различных эмиссий, усиливающих их вредное влияние на окружающую природную среду.

Известно, что в 1 г бытовых отходов содержится до 1 млрд. микроорганизмов, а в медицинских отходах – их число возрастает до 200 – 300 млрд. На полигонах микроорганизмы вымываются грунтовыми водами, биологический материал гниет (или даже горит), выделяя газы, а ветер разгоняет инфекции на десятки километров. Контакт с использованными медицинскими инструментами – особенно колющими и режущими – чреват заражением инфекционными болезнями. Не говоря уже о том, что многие отходы лечебных учреждений токсичны, а порой и радиоактивны. Львиная доля медицинских отходов эпидемически опасна. Однако, не менее опасны простроченные или неиспользованные лекарственные средства, если они не утилизированы должным образом. Это, во-первых, цитостатики – противоопухолевые препараты, которые при попадании в окружающую среду несут серьезную угрозу. А во-вторых, антибиотики, к воздействию которых микрофлора природной среды «привыкает», становясь неуязвимой для этих препаратов [161].

Распространенной проблемой несанкционированных мест скопления отходов является свалочный газ, выделяющийся в результате анаэробного разложения органических отходов, в составе которого метан и углекислый газ. Он негативно влияет на близлежащую растительность и способствует образованию парникового эффекта. Темпы разложения разных веществ в общей массе отходов неодинаковы, поэтому и влияние отдельных фракций на образование фильтрата будет различным. Это значит, что, период времени, который пройдет от начала образования свалки и до начала проникновения фильтрата в грунтовые воды, является неизвестным, а, следовательно, к моменту обнаружения свалки негативные последствия от влияния фильтрата на окружающую природную среду могут быть значительными.

Поэтому, можно утверждать, что такие объекты существенно снижают уровень экологической безопасности. Таким образом, раннее обнаружение мест несанкционированного скопления различных видов отходов и постоянное слежение за ними являются актуальными задачами в области обеспечения экологической безопасности.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются таким источником информации, который позволяет получить полную, актуальную, оперативную картину мест расположения несанкционированных свалок отходов при меньших временных, трудовых и финансовых затратах. Отличительными особенностями геоинформационных технологий в системе управления экологической безопасностью являются оперативность обнаружения источников формирования экологической опасности, возможность идентификации степени их опасности и контроля динамики накопления. Именно эти особенности могут иметь решающее значение в предотвращении негативного влияния на окружающую природную среду, и как следствие обеспечить повышение уровня экологической безопасности.

Рассматривая в целом проблему обращения с отходами, целью данного раздела является анализ возможности использования широкодоступных данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий для оперативного выявления мест несанкционированного скопления отходов и их идентификации как источников формирования экологической опасности техногенного характера. Для практической реализации оперативного выявления свалок требуется специализировать методологию выявления и распознавания свалок под органические составляющие, которая базируется на методах анализа материалов дистанционного зондирования Земли.

Использование космических снимков и цифровых карт позволяет выявить и проанализировать размещение несанкционированных мест скопления отходов относительно населенных пунктов, учитывая особенности естественно-техногенных систем в зонах их расположения [130]. В 2007 году

первые исследования по геодинамическому районированию территории для анализа размещения полигонов захоронения отходов проведены исследователями Готыняном В. С., Аристовым М. В., Томченко О. В. и Миколенко Л. И. [5]. Анализу и поиску возможностей использования многоспектральных космических снимков для идентификации несанкционированных свалок путем определения яркостных характеристик посвящены работы [76, 111]. Дешифровке космических снимков посвящены исследования и зарубежных ученых [255, 259].

Методы дистанционного зондирования Земли, в сочетании с ГИС и методами математического моделирования дают возможность комплексно исследовать источники формирования экологической опасности и принять решение относительно способов обращения с ними. Использование отмеченных методик предложено в работах авторов Трофимчука А. Н., Готыняна В. С., Грекова Л. Д., Федоровского А. Д., Яковлева Е. А. и др.

3.2. Исследование и анализ характеристик мест скопления отходов

Свалки могут появляться в местах заброшенных или уже неиспользуемых карьеров, шахт и котлованов. По геоморфологическим признакам выделяются свалки в понижениях рельефа (с обвалованием и без него), равнинные (отвальные) и прислоненные к склонам.

Места накопления отходов классифицируют по следующим критериям:

- 1) срокам хранения отходов – постоянные и временные;
- 2) типу отходов – свалки мусора и особых отходов (могут содержать ядовитые вещества);
- 3) типу и предварительной обработки отходов – свалки инертных веществ, остаточных продуктов, специальных веществ или мусорные свалки;
- 4) конструкции – насыпные, контейнерные и подземные;
- 5) типу складирования – смешанные, «моносвалки» с отдельным

складированием (предварительной сортировкой).

Классификация по типам отходов предусматривает выделение нескольких групп свалок. К первой группе относят строительные отходы, металлургические шлаки, обломки дорожных покрытий и др. Вторую группу образуют породы и подобные материалы (грунт с содержанием нефтепродуктов до 2 %, продукты сжигания, радиоактивный песок, грунт невысокой степени загрязнения, естественные фильтровые материалы). К третьей группе относят золу и пыль (зол всех типов, грунты с содержанием нефтепродуктов до 2...5 %, продукты очистки газов, глинистые почвы, гипсовые отходы, пыль в упакованном виде). Четвертую группу представляют шламы (очистные шламы, грунты с содержанием нефтепродуктов более 5 %, соли и их соединения, шламы красок, гипса, гидроокисей, бурильные, абразивные и осадочные). К пятой группе относятся прочие отходы (все виды упаковок, отходы, не относящиеся однозначно к перечисленным выше группам). Шестую группу представляют отходы особого характера (ядовитые жидкости, шламы и породы, яды 1-го и 2-го классов).

Основные виды свалок выделяют по типу складироваемых отходов:

- строительного мусора и породных масс;
- бытовых отходов;
- вредных веществ;
- смешанные свалки (бытовой мусор в сочетании с вредными веществами).

По характеру и степени воздействия на природную среду выделяют:

- производственный мусор, состоящий из инертных материалов, утилизация которых в настоящее время экономически нецелесообразна;
- утилизируемые материалы (вторичное сырье);
- отходы 3 класса опасности;
- отходы 2 класса опасности;
- отходы 1 класса опасности.

Учет и мониторинг свалок представляет собой серьезную проблему, связанную со сложностью определения местоположения и занимаемой площади.

Места скопления отходов являются сложными многофакторными природно-техническими системами с интенсивным воздействием на окружающую среду. Мониторинг этих систем представляет собой цепь наблюдений для выявления тенденций качественного и количественного изменения состояния природной среды в пространстве и времени.

3.3. Дистанционное зондирование и расшифровка космических снимков при обнаружении несанкционированных мест скопления отходов

3.3.1. Дистанционное зондирование Земли в системе управления экологической безопасностью

Использование данных ДЗЗ и проведение оперативного мониторинга окружающей природной среды является наиболее эффективным направлением для решения задач управления природными ресурсами и анализа их состояния.

Экстремальные природные явления, к которым относятся наводнения, затопления, а также обмеление озер и водохранилищ, происходят не так часто, однако они подготавливаются постепенно, и их последствия могут быть усилены даже небольшими изменениями в природной среде или антропогенными воздействиями.

Прогноз поведения водных объектов составляется на основе анализа их гидрологических моделей и учета данных по метеоусловиям, уровням и расходам воды. Спутниковые системы с большой повторяемостью за короткий промежуток времени обеспечивают получение информации для

определения параметров моделей, характеризующих гидрологические особенности и водный бассейн территории: топографию бассейна, типы и распределение растительных покровов, типы почв, типы коренных пород русла и др.

Использование спутниковых данных совместно с опорной наземной информацией позволяет создавать более точные и сложные гидрологические модели, чем те, которые создавались по одним наземным измерениям и нередко носили линейный характер.

В лесном хозяйстве с помощью космического мониторинга оперативно выявляют места возникновения пожаров, прогнозируют чрезвычайные ситуации, что позволяет во многих случаях предотвратить их появление.

Наиболее распространенные задачи, решаемые в сельском хозяйстве с применением спутниковых данных: мониторинг сельскохозяйственных угодий, контроль над землепользованием, прогноз урожайности. Система дистанционного мониторинга земель дает возможность инструментального контроля достоверности собираемой статистической отчетности. Средствами космического мониторинга решается проблема мониторинга использования земель сельскохозяйственного назначения. В настоящее время внедряется метод прогнозирования урожайности. Для определения соответствия прогнозов урожайности и статистических отчетных материалов, отсчитывается прогноз на несколько лет назад и проверяется статистическая достоверность прогнозов. Также ДЗЗ позволяет с высокой точностью определить границы участков земли. Геоинформационные системы и ДЗЗ используются для мониторинга в различных сферах деятельности. Данный метод универсален и современен.

ДЗЗ по космическим снимкам дает возможность определять загрязнения атмосферы выбросами различного состава по шлейфу дыма, загрязнения водоемов сточными водами по их следу.

Космические снимки Земли и других небесных тел используют так же для, определения наличия полезных ископаемых, в целях военной разведки и для других задач.

В представленной работе предлагается применение ДЗЗ для обнаружения источников формирования экологической опасности, в частности, несанкционированных мест скопления отходов.

3.3.2. Определение параметров и разработка общей модели выявления несанкционированной свалки на космическом снимке. Векторизация и расчет площади полигона

Как правило, под понятием космические снимки в широких массах понимают обработанные данные дистанционного зондирования Земли, представленные в виде визуальных изображений, например, Google Earth, SasPlanet. Исходная информация космических снимков представляет собой зарегистрированное определенным видом сенсоров электромагнитное излучение. Такое излучение может иметь как естественный природный характер, так и отклик от искусственного (антропогенного или иного) происхождения.

Снимки, использующие отклик от искусственного излучения, похожи на фотографию ночью при фотовспышке, когда естественное освещение отсутствует и используется свет, отраженный от яркой вспышки лампы. В отличие от любительской съемки, космические аппараты могут использовать переизлучение (отражение) в диапазонах электромагнитного спектра, выходящего за пределы оптического диапазона, видимого глазом человека и чувствительного для сенсоров бытовых камер.

Качество данных, получаемых в результате дистанционного зондирования, зависит от их пространственного, спектрального, радиометрического и временного разрешения. Пространственное разрешение

характеризуется размером пикселя (на поверхности Земли), записываемого в растровую картинку – обычно варьируется в диапазоне 1...4000 м. Спектральное разрешение определяется шириной спектральных зон съемки при многозональной и гиперспектральной съемке и измеряется в нанометрах или микрометрах. Наиболее низкое спектральное разрешение в сотни нанометров имеют панхроматические снимки, а наиболее высокое, до 10 нанометров – гиперспектральные. Радиометрическое разрешение это число уровней сигнала, которые сенсор может регистрировать. Обычно варьируется от 8 до 14 бит, что дает от 256 до 16384 уровней. Эта характеристика также зависит от уровня шума в инструменте.

В соответствии с классификатором [10] для успешного выполнения поставленных задач необходимо использовать космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения (0,5 – 15 м.) в спектральном диапазоне 0,4 – 1,1 мкм., а именно QuickBird, WorldView, GeoEye, Pleiades, Ikonos и др. Эти снимки позволяют дешифровать свалки, производить измерение площади и др. Такие изображения были получены из архивных баз данных картографических серверов в сети Интернет.

Для получения спутникового изображения земной поверхности был избран сервис Google Earth, как наиболее доступный источник геоинформационных данных. Современные геоинформационные системы содержат немалое количество универсальных методов анализа, которые заключаются в выделении исследуемого объекта по яркости пикселей.

Все виды отходов имеют различные характеристики, такие как плотность, габаритные размеры, химический состав, отражающая способность материала отхода и т. д. В связи с этим места скопления отходов, при разделении снимка на классы, могут сливаться с дорогами, различными постройками, растительностью и другими объектами. Поэтому выделение свалки отходов по яркости пикселей космического снимка дает много ошибок. Также существует проблема нормализации снимков при различной степени освещенности. Следовательно, методом универсальной

классификации снимка выявить место скопления отходов и определить его площадь с необходимой точностью затруднительно.

Добавление текстурных признаков (расчета дисперсии среднего пикселя в скользящем окне) позволяет выявить зоны с резкими перепадами яркостных характеристик.

Методика выделения контуров свалок с использованием как яркостных так и текстурных методов описано работе [146, 156]

При компьютерной обработке снимков непосредственно используют цифровые эквиваленты яркости, зональной яркости [204]. Однако возможное конструирование искусственных яркостных признаков. Вместо цифровых эквивалентов яркости непосредственно в точках изображения можно применять средние значения яркости в окрестностях этих точек или медиану последовательности яркостей элементов в окрестности точки. В качестве яркостных признаков объектов, которые включают в себя некоторое множество элементов изображения, были использованы характеристики, описывающие форму гистограммы яркости, - среднее значение яркости, дисперсия, коэффициент асимметрии, эксцесс. Эти характеристики определяются следующими выражениями

$$m = \frac{1}{n-1} \sum_{i,j} I_{i,j}, \quad (3.1)$$

$$D = \frac{\sum_{i,j} (I_{i,j} - m)^2}{n-1}, \quad (3.2)$$

$$S = \frac{\sum_{i,j} (I_{i,j} - m)^3}{(n-1)D^{3/2}}, \quad (3.3)$$

$$Kr = \frac{\sum_{i,j} (I_{i,j} - m)^4}{(n-1)D^4}, \quad (3.4)$$

где m – среднее значение пикселей в сканирующем окне; I – значение яркости пикселя; i, j – координаты пикселей в сканирующем окне; n – количество пикселей в сканирующем окне; D – дисперсия значений яркости; S – скошенния (асимметрия); Kr – эксцесс.

Для использования в компьютерной обработке снимков структурных признаков требуется применение специальных процедур их формализации. При формализации признака характера распределения яркости по площади объекта в работе [86] была использована процедура разложения поля яркости изображения в спектр пространственных частот. Для этого проводилась обработка анализируемого фрагмента изображения скользящим окном заданной формы. Для линейной обработки скользящим квадратным окном яркость преобразованного изображения определяется так

$$f(i, j) = \sum_{i=i_0-w}^{i_0+w} \sum_{j=j_0-w}^{j_0+w} F(i, j)H(i - i_0 + w + 1, j - j_0 + w + 1), \quad (3.5)$$

где H – заданная матрица размера $(2w+1) \times (2w+1)$ – маска оператора линейного превращения; f – поле параметров преобразованного изображения.

Превращение являет собой операцию дискретной свертки изображения с маской H . Для разложения поля изображения $F(j, k)$ в спектр пространственных частот используют разные процедуры унитарных превращений: Фурье, Адамара, Хаара, наклонное превращение. В общем случае для скользящего окна квадратной формы размера $N \times N$ спектральные коэффициенты $f(u, v)$ определяют выражением

$$f(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^N F(j, k) A(j, k, u, v), \quad (3.6)$$

где $A(j, k, u, v)$ - ядро прямого превращения.

Набор спектральных коэффициентов является признаком, который наиболее полно характеризует изменение яркости по площади изображения. Для формализации данного признака использованы также упрощенные подходы. Один из них заключается в использовании значения градиента яркости. Для этого выполняют процедуру пространственного дифференцирования анализируемого фрагмента изображения, то есть находят производные $\frac{\partial F}{\partial x}$ и $\frac{\partial F}{\partial y}$ путем свертки изображения с градиентными масками N_x и N_y . В качестве формализованных признаков использовано непосредственно значение $\frac{\partial F}{\partial x}$ и $\frac{\partial F}{\partial y}$ и значение модуля градиента и тангенса угла его наклона к оси Ox .

Наиболее сложной является формализация текстуры изображения, то есть объекта, который характеризует форму, размер и взаимное положение элементов, складывающихся объект. Для текстуры характерна пространственная повторяемость локальной структуры поля яркости. Поэтому качественно текстуру можно характеризовать величиной периода повторяемости. Для количественного описания текстуры известны разные подходы [93, 112]. Один из них основан на анализе спектра пространственных частот. Большой текстуре отвечает спектр, энергия которого сосредоточена на низких пространственных частотах, а мелкой текстуре – на высоких.

Для автоматизации процесса признаки были запрограммированы в среду Erdas в Model Maker. На рис. 3.2. приведена схема модели построения критериев различения на снимке с привлечением сканирующего окна.

Матрица окна выбиралась из расчета суперпозиции двух факторов. Чем больше матрица, тем больше достоверность построения признаков, чем меньше матрица, тем более точное различение одного объекта от другого. Поэтому было избрано при исследовании матрица сканирующего окна размером 5×5 .

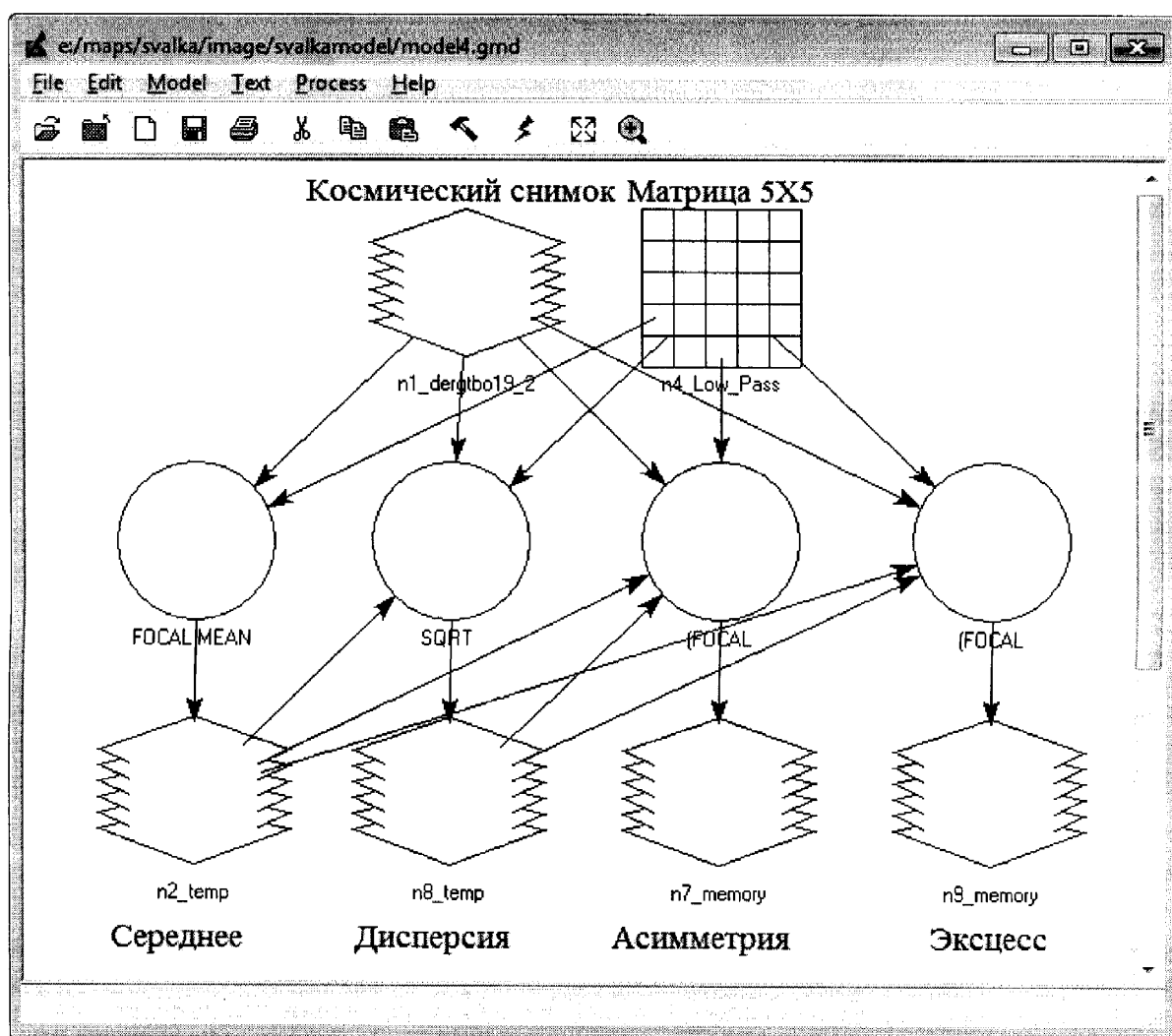


Рис. 3.2. Модель построения критериев различия

Построение зоны свалки отходов на снимке и расчет гистограмм позволяет создать диапазон значений пикселей, которые принадлежат свалке для дальнейшего ее выделения. На рис. 3.3. изображены гистограммы полигона, по которым избраны следующие диапазоны исследуемого объекта:

среднее значение яркости – 130 – 195 мкм, дисперсия – 6-30 мкм, асимметрия – 0 – 4 мкм, эксцесс – 0 – 14 мкм. Для автоматизации выделения объекта диапазоны запрограммированы в модель Model Maker (рис. 3.4.).

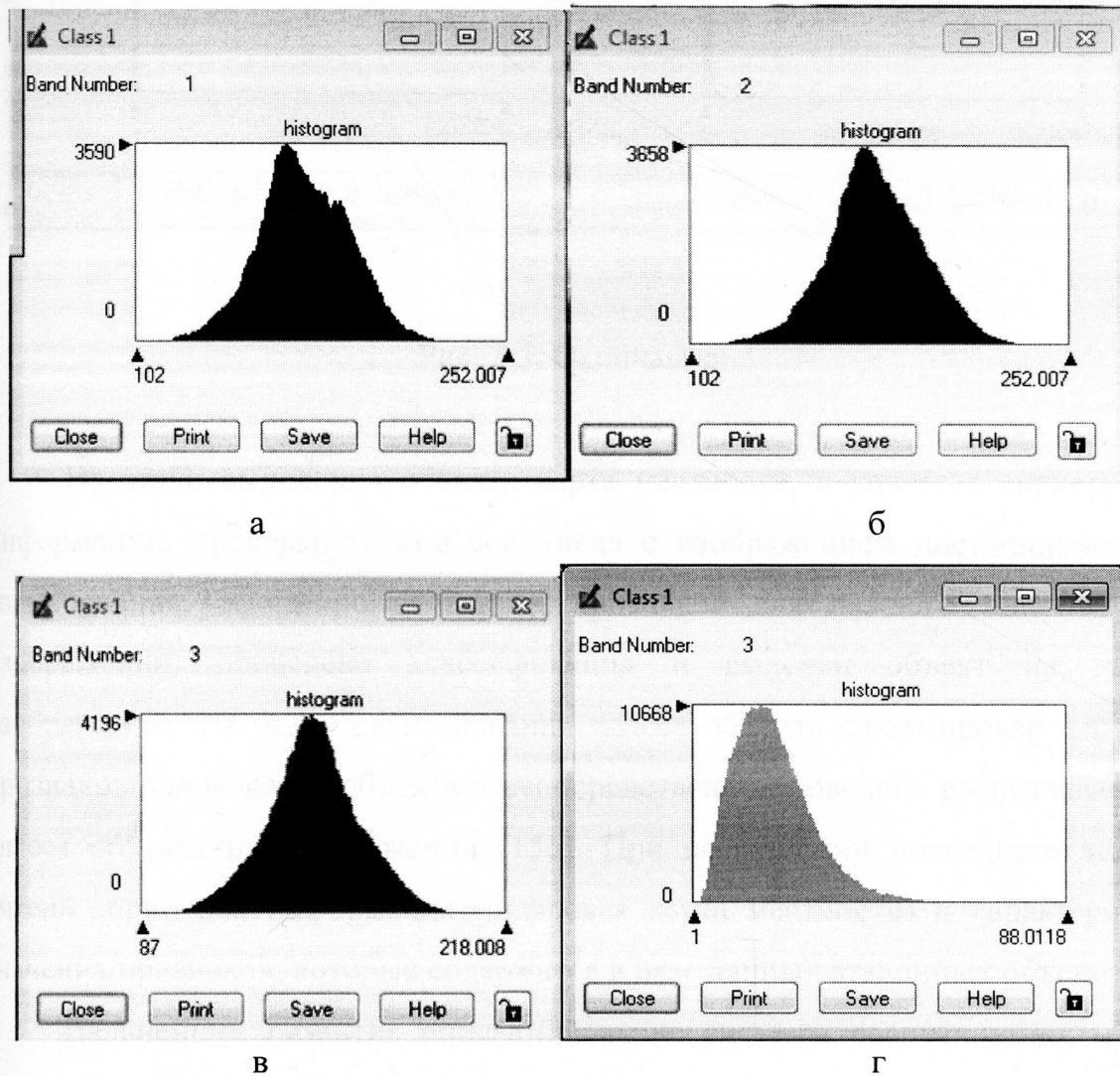
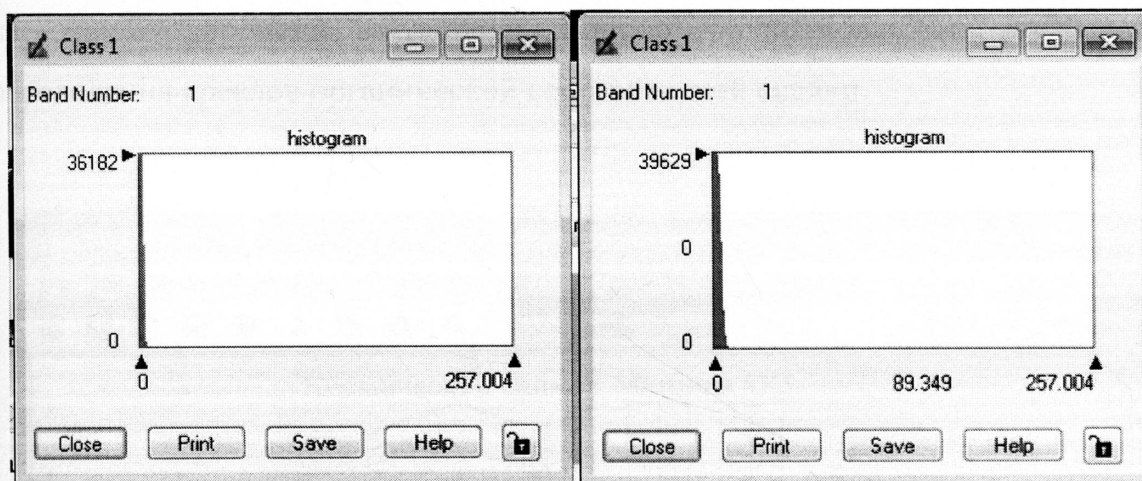


Рис. 3.3. Гистограммы свалки со строительным мусором и породными массами: а – красный канал среднего, б – зеленый канал среднего, в – синий канал среднего, г – дисперсии, д – асимметрии, е – эксцесса



д

е

Рис. 3.3. Окончание

На этапе выделения объекта карта местности, в качестве априорной информации, пространственно соединена с изображением дистанционного зондирования, сформирован вектор признаков для каждого пикселя на изображении, проведена классификация и выделен объект на этом изображении. На этапе распознавания класса объекта сформирован вектор признаков для каждого объекта и непосредственно проведено распознавание класса объекта на изображении [156]. При выполнении последнего этапа учтена априорная информация (цифровая карта местности) и характерные значения признаков, которые содержатся в базе данных эталонных объектов.

Дальнейшее развитие описанной выше системы распознавания мест несанкционированного складирования отходов заключается в классифицировании объектов свалки по степени их влияния на экологическую безопасность.

Непосредственное отделение зоны углеродсодержащих материалов и органической составляющей свалки от неорганической – это задача, реализуемая с множеством ошибок первого рода. Это объясняется тем, что органика на космических снимках по яркостным и текстурным параметрам схожа с окружающей растительностью (травой, лесами, садами) [156]. Учитывая опыт научных и практических исследований, накопленный к

настоящему времени, возникает вопрос о возможности косвенного определения ареалов органической составляющей свалки.

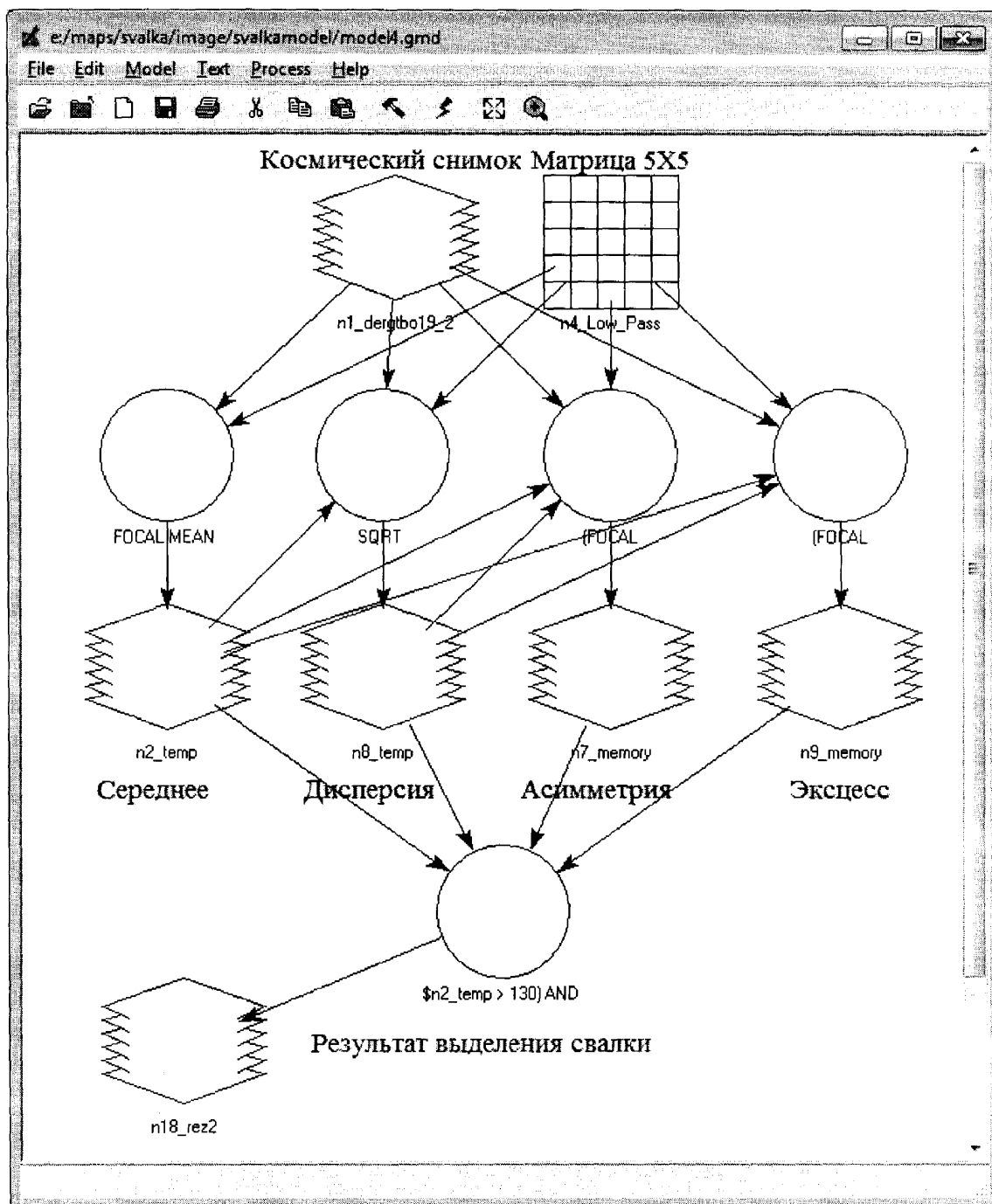


Рис. 3.4. Схема модели автоматизированного распознавания территории накопления отходов

Способ косвенного определения ареалов исследования предлагается проводить путем исключения («вырезания») со снимка участков свалки с низкой степенью опасности, таких как строительный мусор и породные массы. Такие отходы представляют меньшую опасность для окружающей природной среды и легко идентифицируются на фоне подстилающей растительной поверхности по яркостным и текстурным признакам, так как существует большой контраст (порог) по отношению к фону.

Как указано в работе [146] диапазон значений пикселей, принадлежащих свалке, с целью дальнейшего ее выделения можно определить путем расчета гистограмм и разработки общей модели. Для определения участка со строительным мусором и породными массами требуется разбить область гистограммы на поддиапазоны или снова создать базу данных диапазонов статистических моментов идентифицируемых объектов путем выделения этих объектов на снимке, получая диапазоны по гистограммам. После идентификации участков со строительным мусором и его оконтуривания, путем исключения из общего контура полигона определяем остальную часть как углеродосодержащие и органические элементы свалки. По итогу проведения таких операций получаем территорию свалки с преобладанием органической составляющей. На рис. 3.5. представлена схема модели автоматизированного распознавания полигона органической составляющей на территории свалки.

Для выявления места складирования отходов и определения площади данной территории требуется пространственная привязка космического снимка.

На первом этапе визуально анализируется исследуемая область на наличие объектов похожих на несанкционированные места скопления отходов. При обнаружении таких объектов область выделяют, делают привязку и сохраняют снимок для дальнейшей работы.

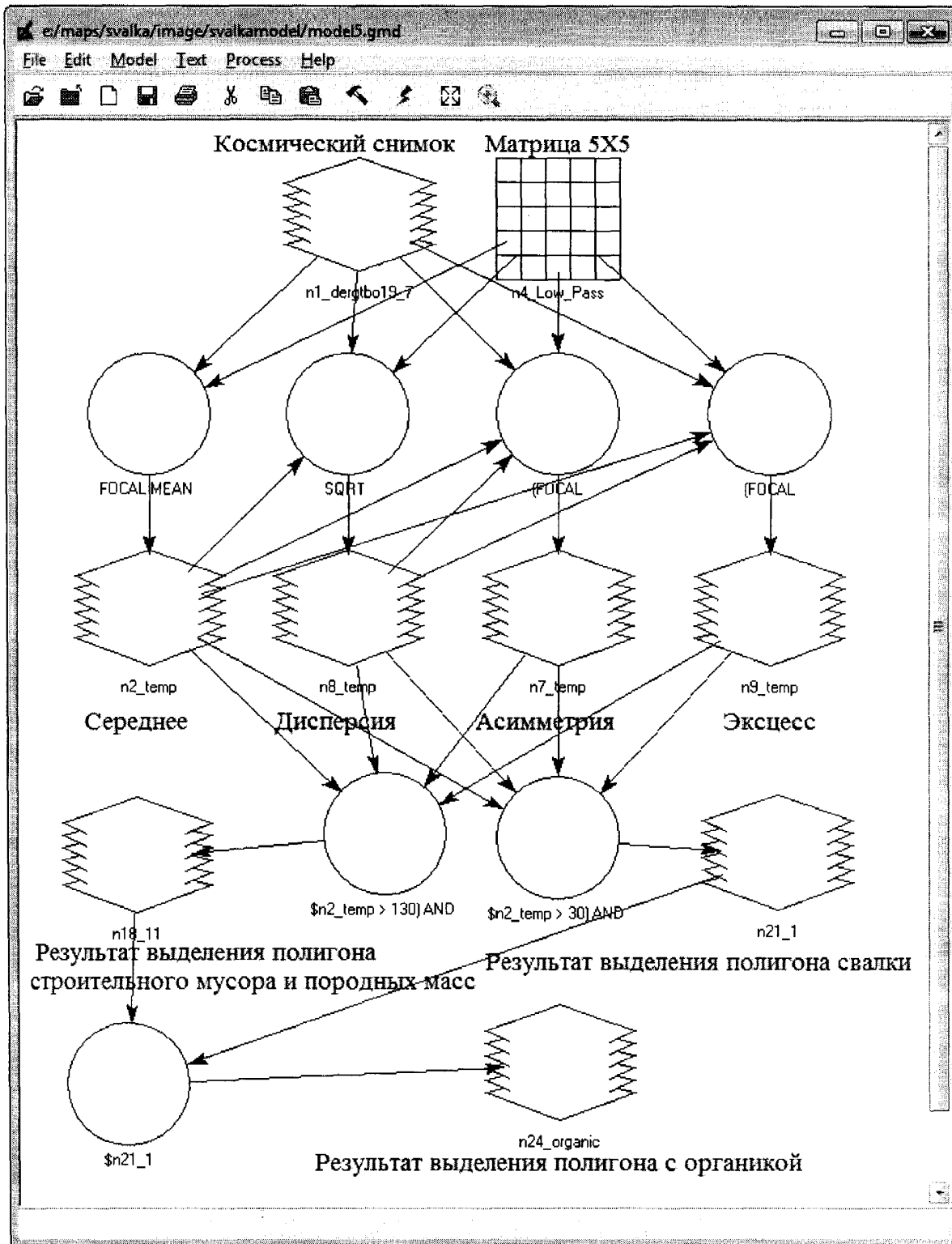


Рис. 3.5. Схема модели автоматизированного распознавания свалки отходов с органической составляющей

Современные программы обработки снимков работают с новыми типами привязки, поэтому может потребоваться трансформация привязки снимков в других геоинформационных приложениях. Программа ArcGIS позволяет трансформировать тип привязки *.w (привязка во внешнем файле) в формат поддерживающий привязку внутри формата *.img.

3.4. Практическая реализация разработанной модели выявления и определения параметров мест несанкционированного скопления отходов

3.4.1. Обработка снимков с данными дистанционного зондирования Земли и их привязка к координатам

Проведем выявление мест складирования отходов, на примере Дергачевского полигона твердых бытовых отходов (ТБО) (Харьковская область). Для этого используем космический снимок полигона за август 2013 г. (рис. 3.6).

Для определения площади полигона подразумевается, что космический снимок имеет пространственную привязку.

На первом этапе визуально анализируем исследуемую область на наличие объектов похожих на несанкционированные места скопления отходов. При обнаружении таких объектов выделяем область, делаем привязку и сохраняем снимок для дальнейшей работы. Современные программы обработки снимков работают с новыми типами привязки, поэтому может потребоваться трансформация привязки снимков в других геоинформационных приложениях.



Рис. 3.6. Дергачевский полигон ТБО (август 2013 г.)

Программа ArcGIS позволяет трансформировать тип привязки *.w (привязка во внешнем файле) в формат поддерживающий привязку внутри формата *.img. (рис. 3.7)

После запуска программы ERDAS, загружаем в нее космический снимок посредством следующих операций: File/Open/Raster Layer/Название сохраненного файла. Привязка всех космических снимков была трансформирована в привязку географического типа WGS_84, так как она одна из наиболее распространенных (рис. 3.8, 3.9).

Функция связки снимков по пространственным координатам позволяет в точности сопоставить пиксель на одном снимке с точно таким же на другом и проследить его изменение.

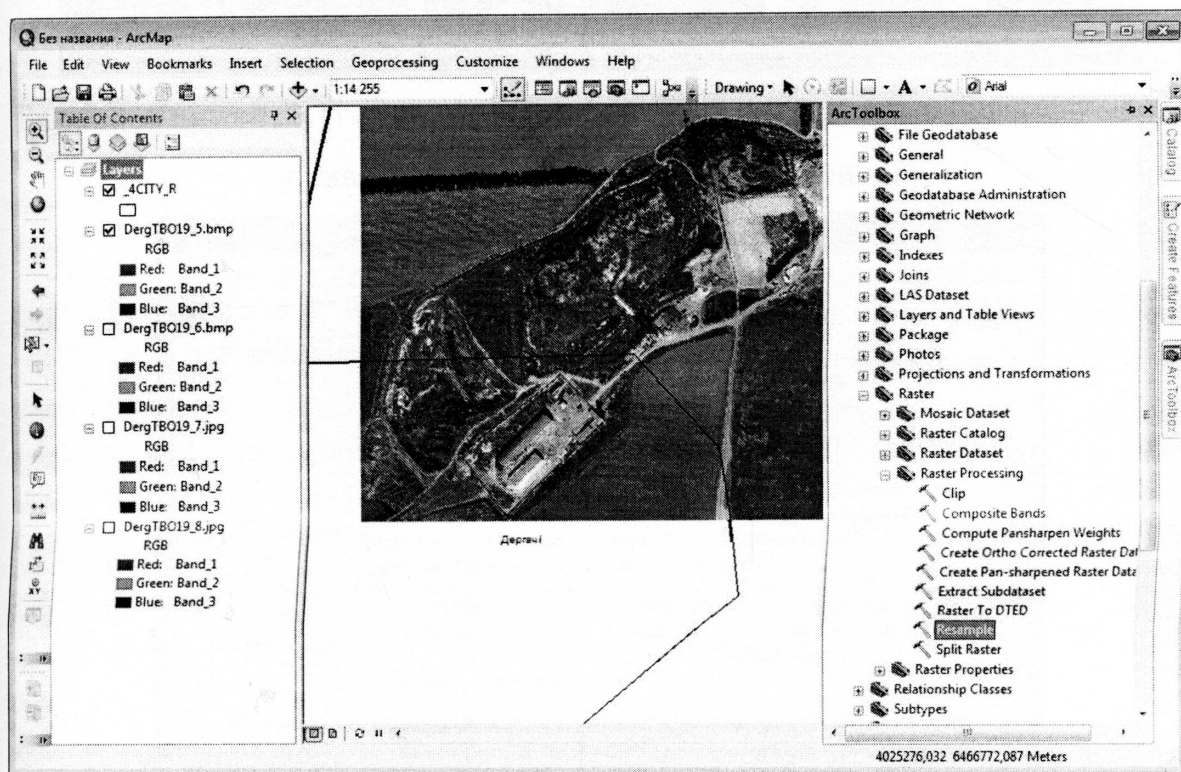
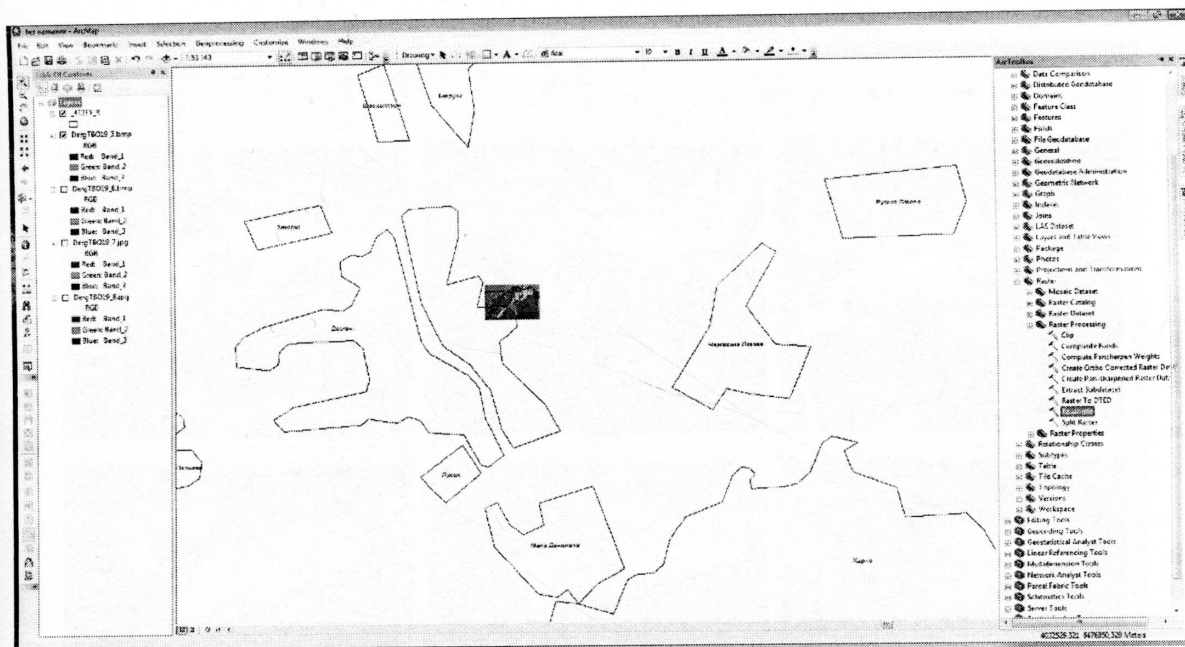


Рис. 3.7. Конвертация форматов в ArcGIS для последующей обработки

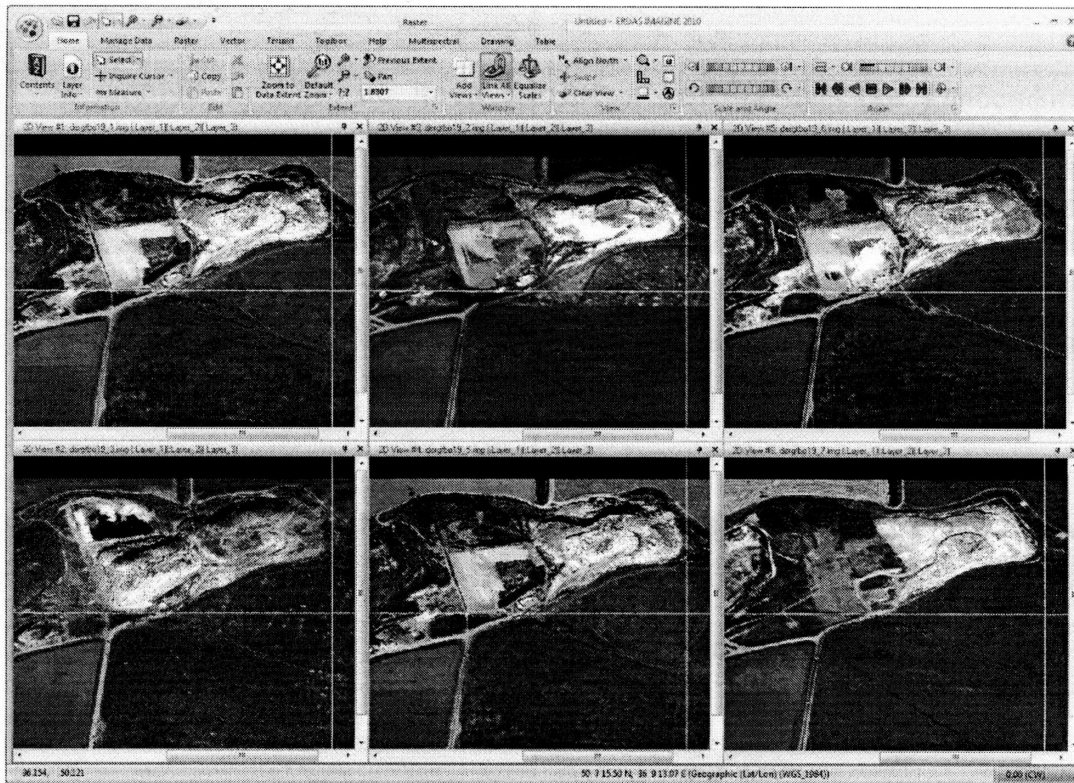


Рис. 3.8. Снимки Дергачевского полигона ТБО соединенные географической привязкой за разные временные периоды

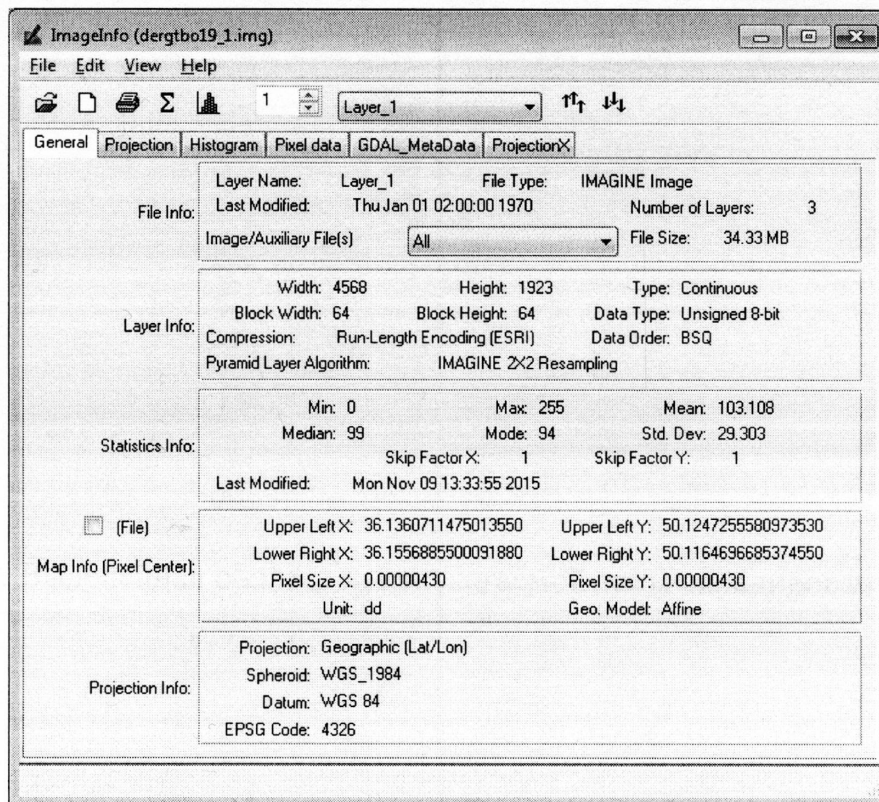


Рис. 3.9. Информация по географической привязке снимка Дергачевского полигона ТБО

В данной программе предусмотрена автоматическая классификация объектов на космическом снимке. Открыв вкладку Classification и выбрав Unsupervised Classification, оператор самостоятельно предлагает количество классов, исходя из визуальных восприятий, и разделяет снимок на необходимое количество классов. Для рассматриваемого снимка принимаем 6 классов. В новом окне Viewer/snimokd, выделяем свалку другим цветом (рис. 3.10).

По таблице оттенков (рис. 3.11) видно, что отходы и дороги окрашиваются одним цветом. Это доказывает, что универсальным способом не удастся выделить свалку и определить его площадь.



Рис. 3.10. Выделенная область предполагаемой зоны складирования отходов

Row	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class_Names
0	0	0	0	0	0	Unclassified
1		0.498039	1	0	1	растительность
2		0.823529	0.705882	0.54902	1	поля
3		0.823529	0.705882	0.54902	1	поля
4		0.823529	0.705882	0.54902	1	поля
5		0.823529	0.705882	0.54902	1	поля
6		0.823529	0.705882	0.54902	1	поля
7		0.647059	0.164706	0.164706	1	дороги
8		0.647059	0.164706	0.164706	1	отходы

Рис. 3.11. Таблица оттенков классификации объектов на космическом снимке

Проведем выделение предполагаемого места скопления отходов, с помощью модели основанной на анализе статистических моментов различных порядков (среднего значения, дисперсии, асимметрии и эксцесса). Для этого находим среднее количество пикселей из определенной части снимка, построив модель Toolbox/Model maker и выбрав команду Focal Scan/Fokal Mean (рис. 3.12). Показываем на снимке область полигона, соответствующую заданной модели расчета среднего количества пикселей (рис. 3.13).

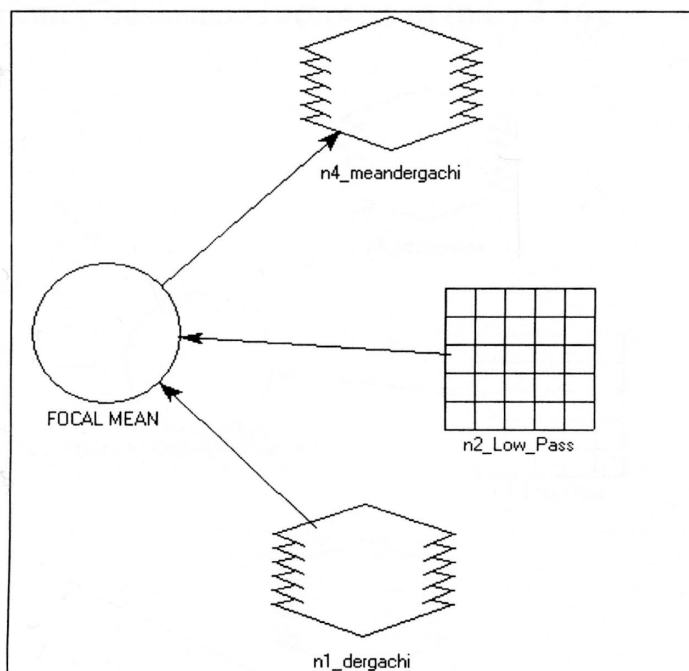


Рис. 3.12. Модель расчета среднего количества пикселей требуемой части снимка



Рис. 3.13. Среднее значение по маске пикселей 5×5

Строим модель дисперсии Focal Scan/Focal Standard deviation (рис. 3.14), представляем ее на снимке (рис. 3.15) и находим диапазон значений дисперсии с помощью гистограмм (рис. 3.16).

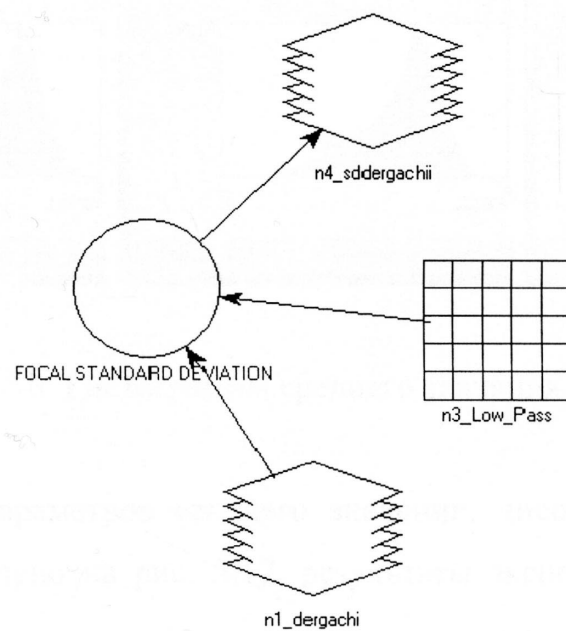


Рис. 3.14. Модель дисперсии



Рис. 3.15. Дисперсия Дергачевского полигона ТБО

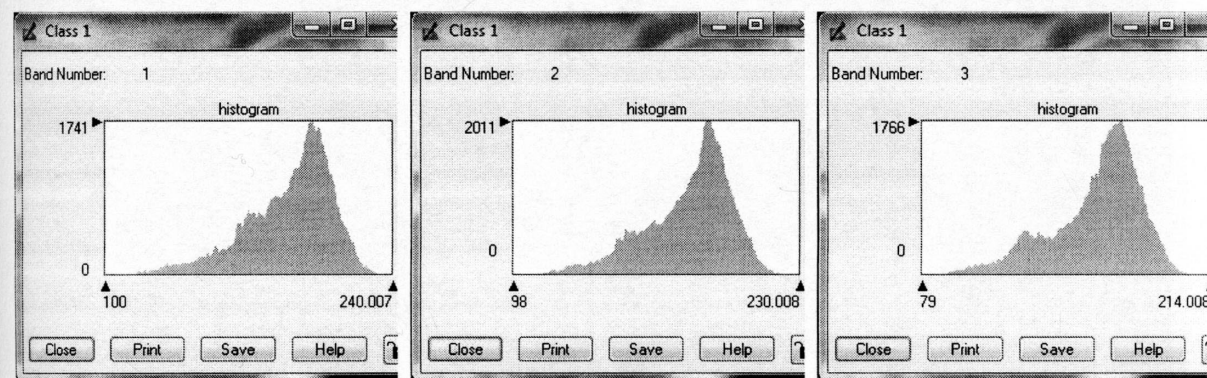


Рис. 3.16. Гистограммы среднего значения пикселей

Модели с параметров среднего значения, дисперсии, асимметрии и эксцесса представлено на рис. 3.17, результаты эксцесса и асимметрии на рис. 3.18, 3.19.

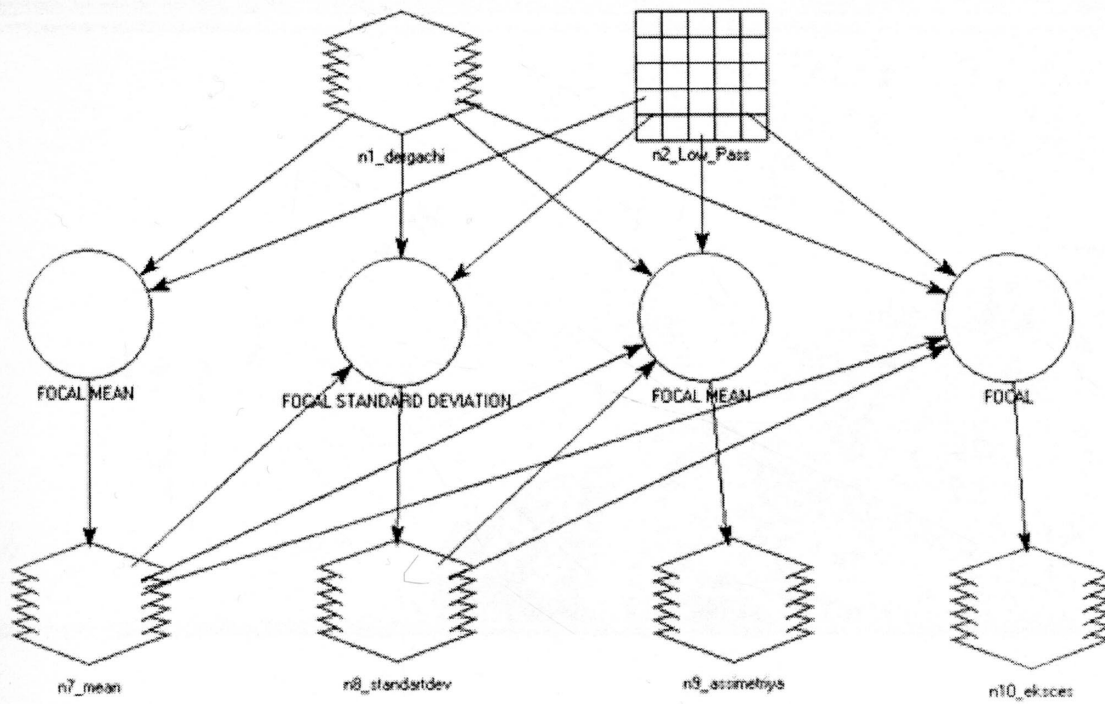


Рис. 3.17. Модель асимметрии и эксцесса

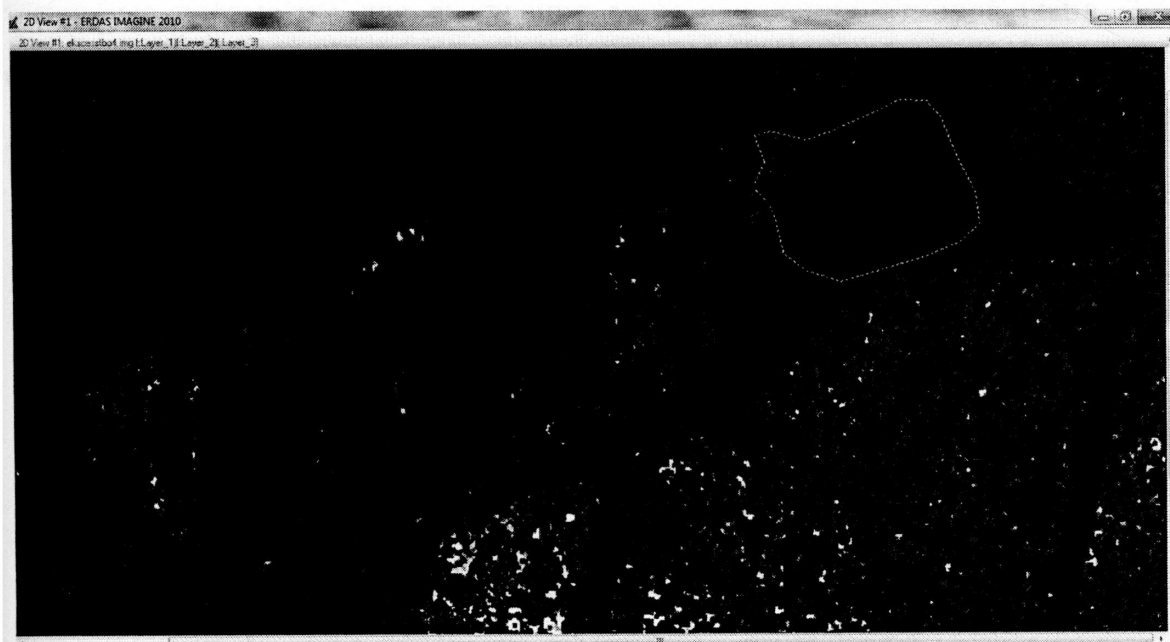


Рис. 3.18. Эксцесс Дергачевского полигона ТБО

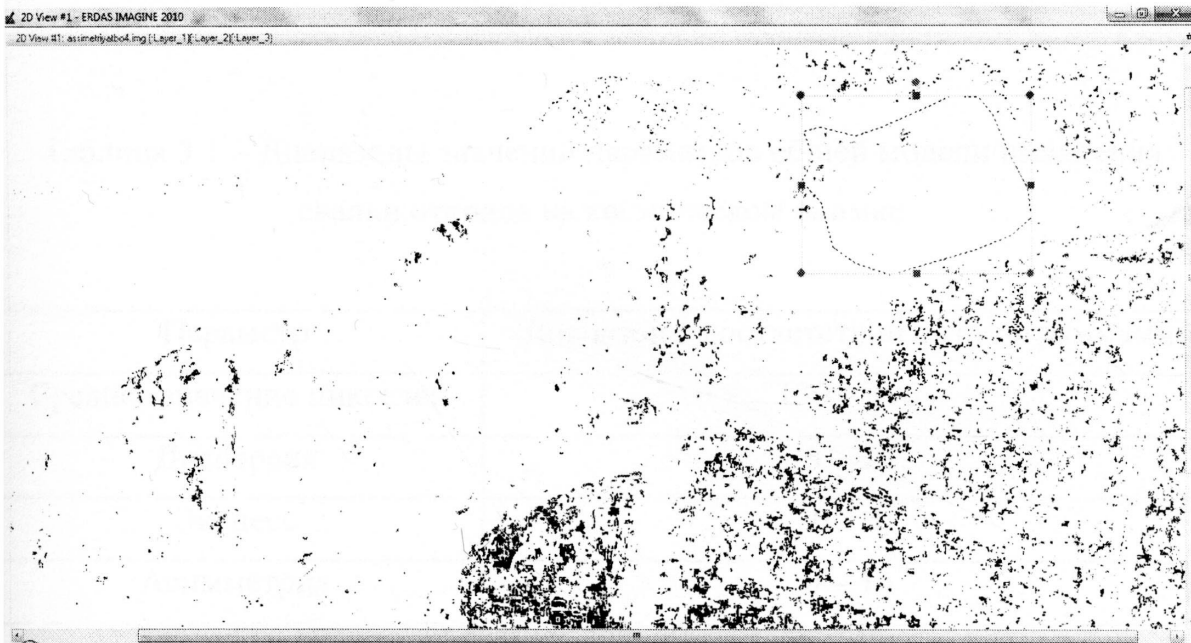


Рис. 3.19. Асимметрия Дергачевского полигона ТБО

Определив в соответствии с гистограммами (рис. 3.16, 3.20) все требуемые параметры для выявления зоны скопления отходов (табл. 3.1), соединяем их общую модель (рис. 3.21, 3.22) и отделяем свалку отходов от других составляющих ландшафта.

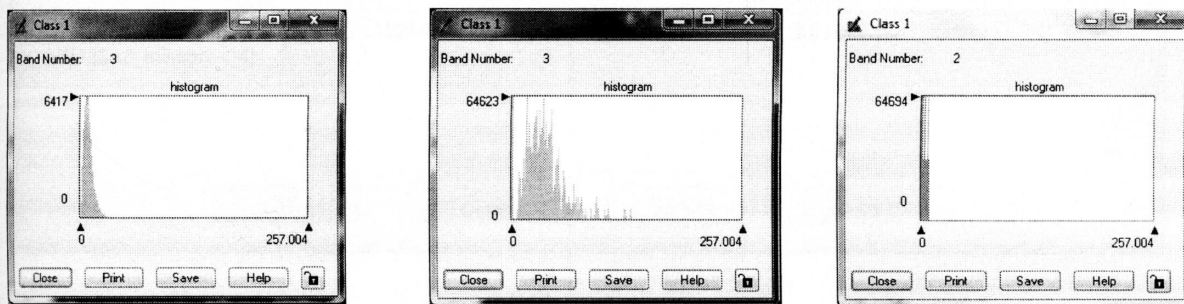


Рис. 3.20. Гистограммы дисперсии, эксцесса, асимметрии

Таблица 3.1 – Диапазоны значений параметров общей модели выявления свалки отходов на космическом снимке

Параметр	Диапазон в соответствии с гистограммами
Среднее значение пикселей	130 – 196
Дисперсия	6 – 30
Экссесс	0 – 4
Асимметрия	0 – 14

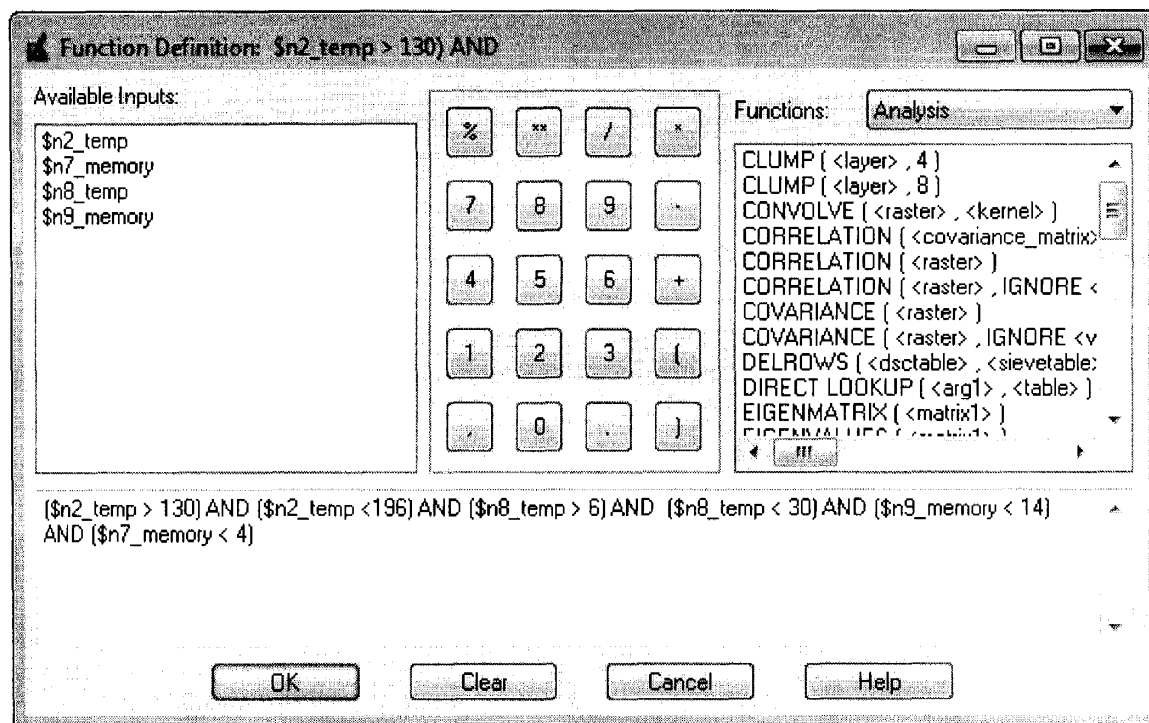


Рис. 3.21. Параметры модели для выявления свалки отходов на космическом снимке

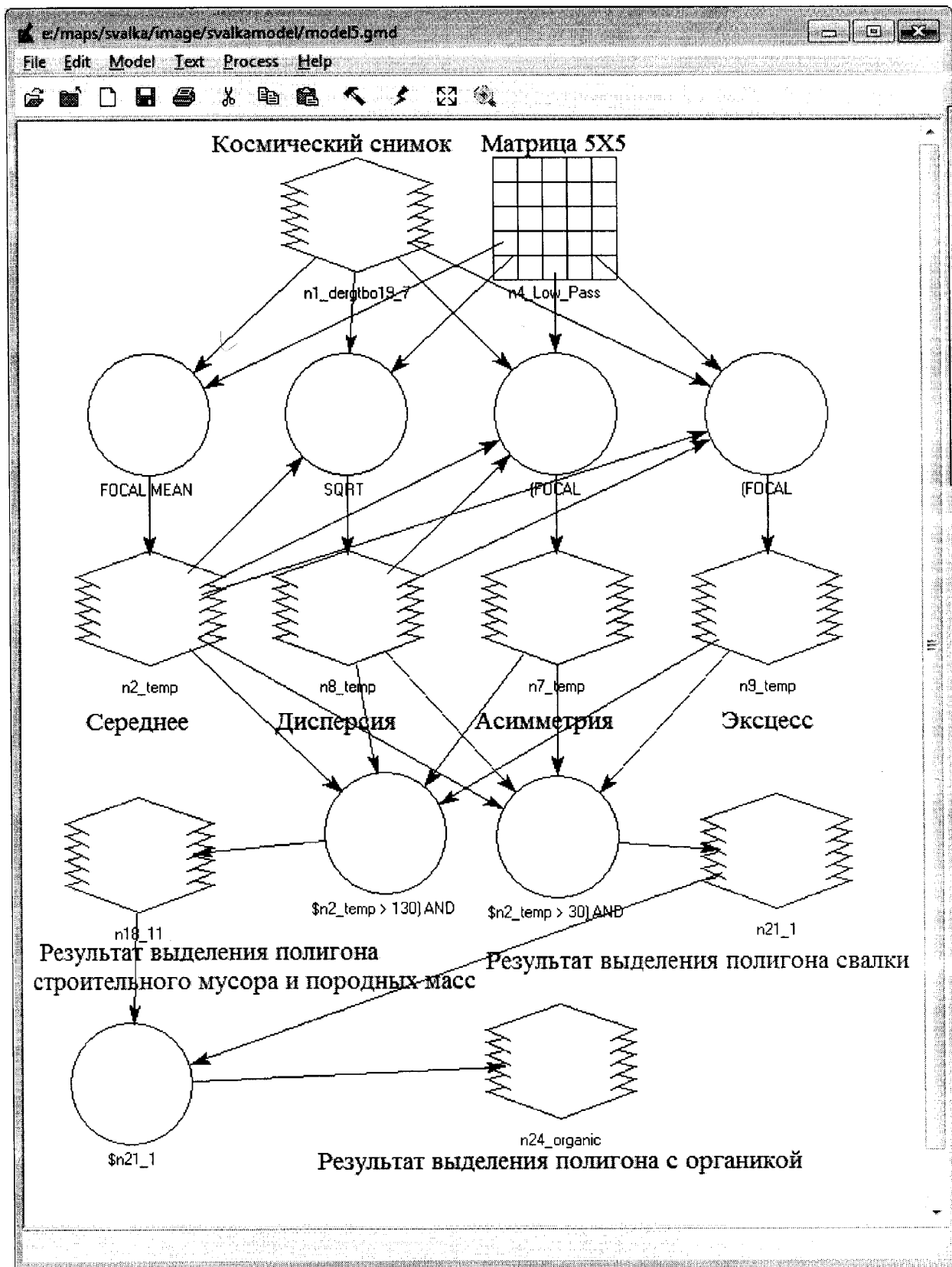


Рис. 3.22. Общая модель для выявления свалки отходов на космическом снимке

Полученная общая модель для выявления свалки отходов на космическом снимке позволяет отобразить границы обнаруженной свалки на карте (рис. 3.23).



Рис. 3.23. Границы свалки обнаруженной на космическом снимке

Векторизация и расчет площади проводят с погрешностью, которая заложена в самой географической системе и пространственной привязке снимка к этой системе координат. Для этого снимок загружают в ArcMap (рис. 3.24), создают шейп-файлы и проводят, классификацию (рис. 3.25), векторизацию (рис. 6.21) и расчет площади (рис. 6.22).

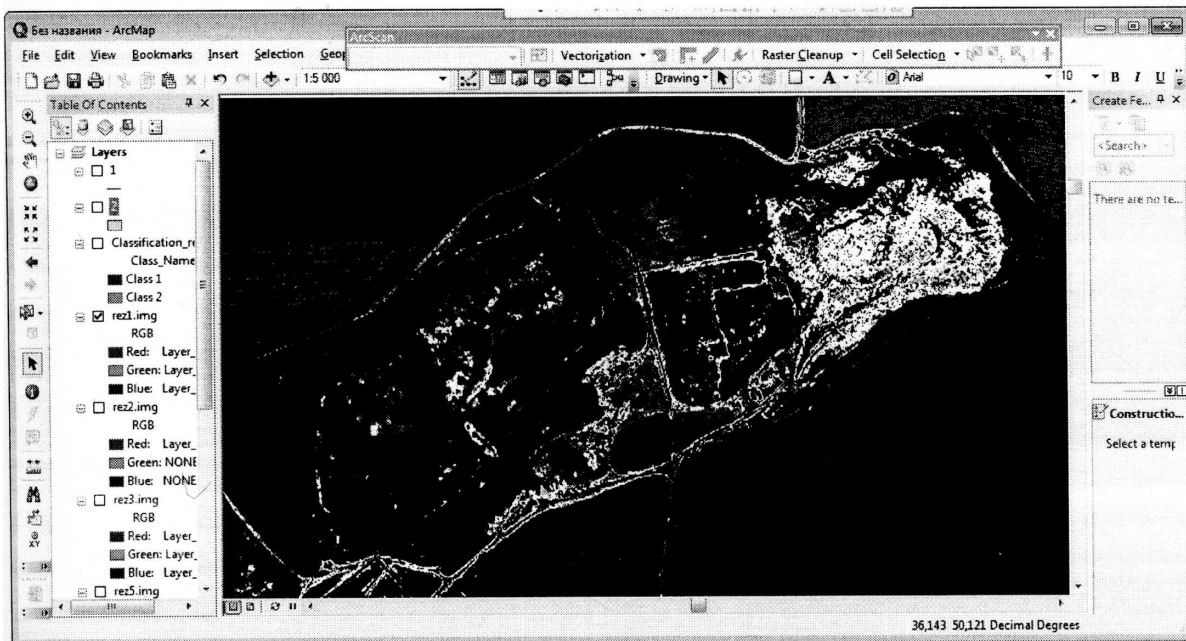


Рис. 3.24. Результат применения модели обнаружения полигона

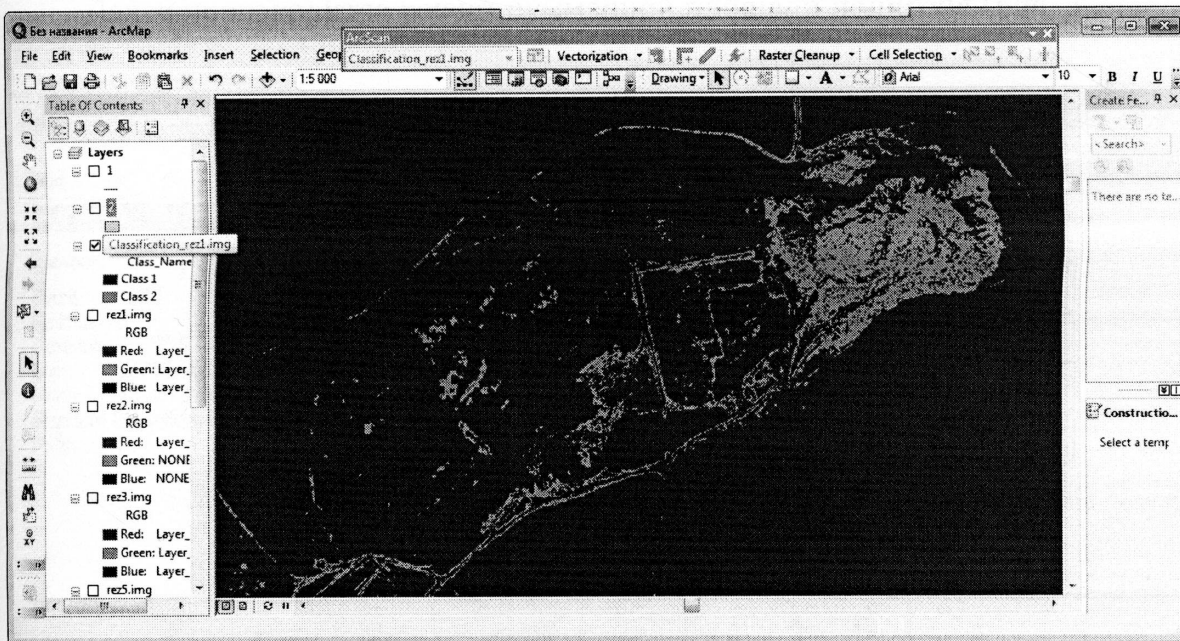


Рис. 3.25. Классифицированный полигон

Выставление параметров векторизации позволяет исключить шумы (мелкие объекты), в данном примере уровень шума был выставлен на 34 %. Результат векторизации представлен на рис. 3.26.

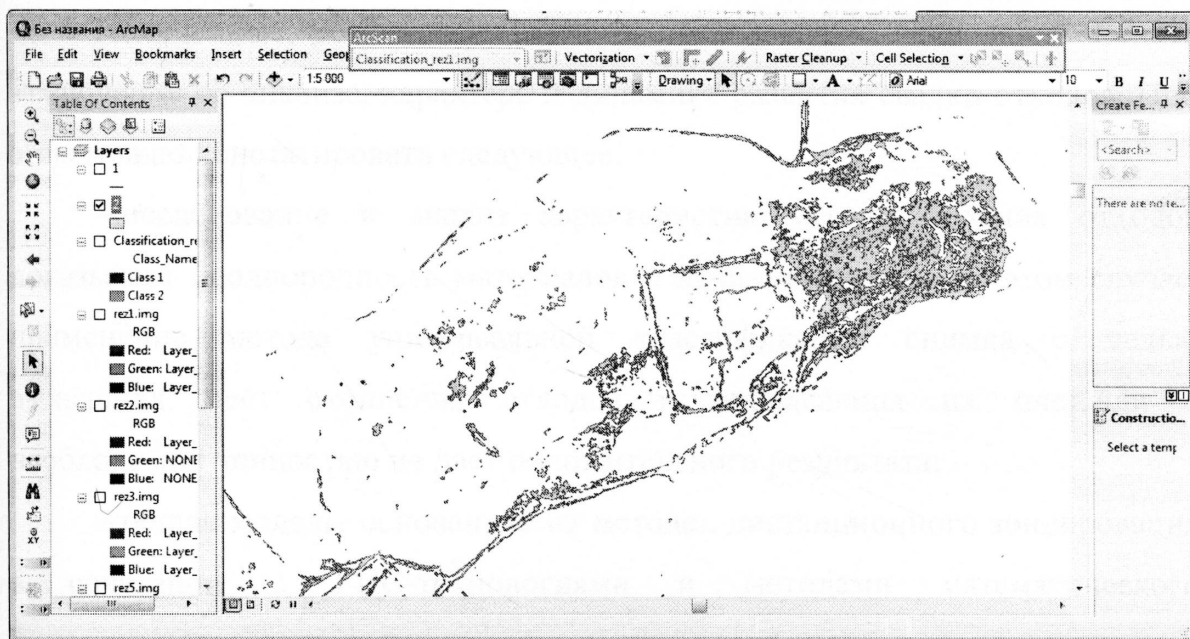


Рис. 3.26. Векторизованный полигон

Далее производится расчет суммарной площади полигона (рис. 3.27).

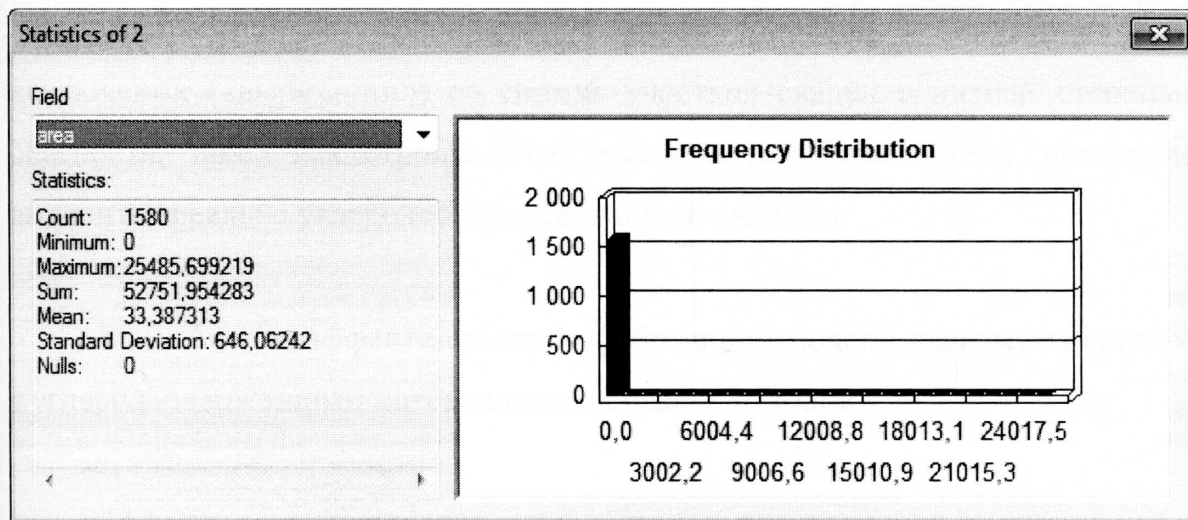


Рис. 3.27. Площадь выявленной свалки в м²

Используя разработанную модель, был выполнен расчет площади свалки Дергачевского полигона твердых бытовых отходов период его эксплуатации с августа 2013 г. по октябрь 2014 г. Результаты расчета представлены в приложении А.

Полученные результаты данного исследования позволяют сделать заключение об анализе, характере и динамике развития свалки отходов. При этом можно констатировать следующее:

– исследование и анализ характеристик мест скопления отходов показывает неоднородность материалов и веществ отходов. В этом случае, применение метода универсальной классификации снимка с целью выявления мест скопления отходов и определения их площади с необходимой точностью не дает положительного результата;

– общая модель, основанная на методах дистанционного зондирования в сочетании с ГИС-технологиями и методами математического моделирования, позволяет выделить свалку отходов на снимках, определить ее площадь и динамику развития. Однако данная модель не позволяет идентифицировать элементы, являющиеся источниками формирования экологической опасности, так как эта задача, реализуется с множеством ошибок первого рода;

– разработанная специализированная модель, основанная на исключении («вырезании») со снимка участков свалки с низкой степенью опасности, таких как строительный мусор и породные массы, позволила выделить ареалы с углеродсодержащими материалами.

3.4.2. Анализ эффективности разработанной модели выделения ареалов с углеродсодержащими материалами на свалке отходов

Эффективность предложенного метода наглядно иллюстрирует анализ космических снимков зоны накопления отходов за разные периоды времени. В качестве критерия выбрано изменение площади исследуемой зоны.

Для анализа взяты снимки за период его эксплуатации с августа 2013 г. по октябрь 2014 г. (рис. Б.1 – Б.6).

Места складирования отходов, выявленные на снимках за разные периоды времени автоматическим способом с помощью разработанной модели, представлены на рис. Б.7, Б.8.

Для более точного определения площади свалки в разные периоды времени, проводим определение диапазона значений пикселей, принадлежащих свалке, расчет гистограмм и разработку общей модели.

Результат выделения органической составляющей по средствам вычитания с территории всей свалки полигонов со строительным мусором и породными массами представлен на рис. Б.9, Б.10.

По результатам расчета можем видеть, что предложенный метод позволил определить динамику увеличения площади свалки (рис. 3.27).

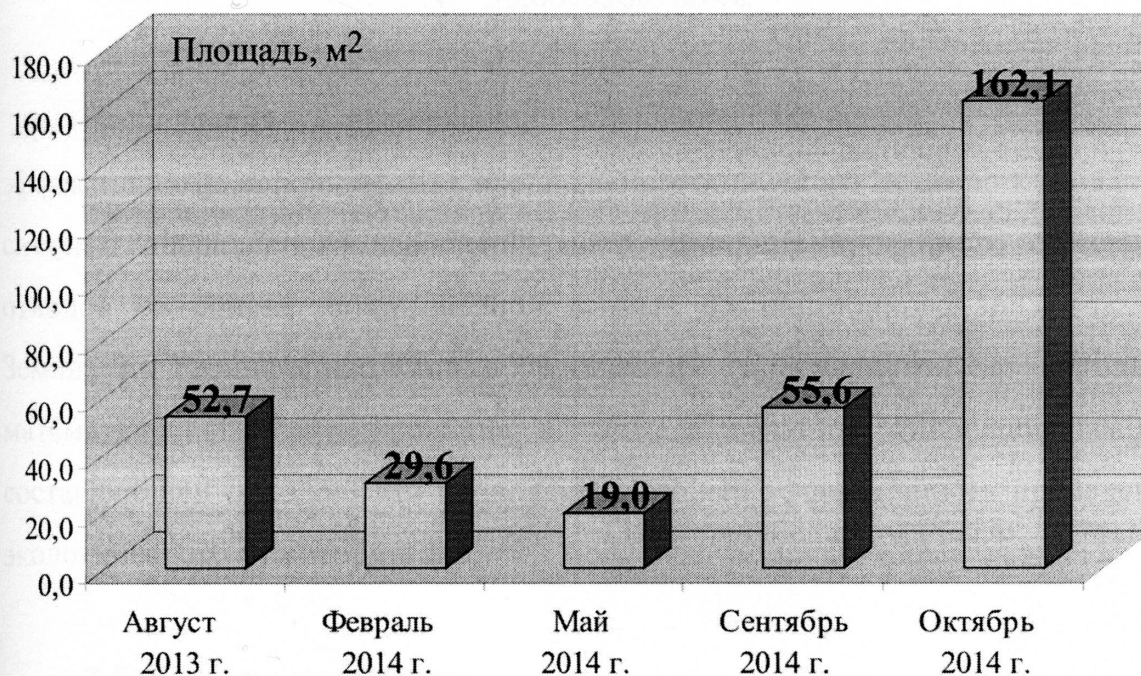


Рис. 3.27. Изменение площади свалки с преобладанием углеродсодержащих материалов во времени

Как критерий оценки точности определения площади можно ввести показатель n , который будет вычисляться как соотношение пикселей ложного определения свалки к величине всех пикселей [159].

$$n = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{N}{k} \right),$$

где N – количество всех выделенных пикселей; k – количество пикселей выделенных ошибочно как территория свалки.

Максимальный показатель ложного определения за периоды исследования составил

$$k = 857871 - 623749 = 234122,$$

$$N = 7928316,$$

$$N = 33,8640366988 \text{ \%}.$$

Исследование, проведенное в работе, позволяет убедиться в эффективности использования предложенного научного подхода к созданию системы оперативного выявления мест несанкционированного скопления отходов на основе использования данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий в сочетании с методами математического моделирования в части выделения углеродсодержащей составляющей отходов, что позволяет повысить эффективность проведения экологического мониторинга.

3.5. Выводы по разделу

1. Обоснован выбор способа обнаружения источников формирования экологической опасности техногенного характера, а именно несанкционированных мест скопления отходов.

2. Исследование, проведенное в работе, позволило убедиться в эффективности использования данных космической съемки для оперативного

выявления несанкционированных мест скопления отходов, однако существует проблема идентификации материалов по степени опасности для экологической безопасности.

3. С целью определения достоверности предложенной методики ее экспериментальная апробация по определению общей площади ареалов углеродсодержащей составляющей свалки проведена на известном объекте – Дергачевском полигоне (Харьковская область). Достоверность предложенного метода наглядно иллюстрирует анализ космических снимков зоны скопления отходов за период его эксплуатации с августа 2013 г. по октябрь 2014 г., который показал увеличение площади, занятой непосредственно углеродсодержащими материалами, с 29,6 тыс. м² до 162,1 тыс. м².

4. Получила дальнейшее распространение общая модель выявления мест скопления отходов по космическим снимкам со специализацией на выделение углеродсодержащих материалов свалки, которая базируется на методах дистанционного зондирования в сочетании с ГИС-технологиями и методами математического моделирования, что позволяет повысить эффективность проведения экологического мониторинга.

РАЗДЕЛ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

4.1. Экологически эффективная утилизация с применением плазменных источников энергии

Современное состояние решения проблемы опасных отходов является актуальной. При разработке технологических процессов и проектировании установок, обеспечивающих экологическую безопасность необходимо одновременно решать достаточно противоречивые задачи, связанные с санитарной очисткой населенных мест, обеспечением нормальной жизнедеятельности населения, экологической безопасности при реализации процесса утилизации, ресурсосбережения и снижения энергетических затрат.

Утилизация опасных отходов – прямая переработка или сжигание значительного их количества – технически весьма проблематична, экологически опасна и экономически неэффективна. Наиболее эффективным способом переработки опасных отходов является плазменная газификация [14, 23, 25, 38, 245].

Установлено, что процесс плазменной газификации обеспечивает экологически чистую переработку сырья (отходов) без образования смол и диоксинов, а также полное извлечение всего углерода из материала отходов, в то время как при всех процессах сжигания в твердом остатке остается до 30 % углерода. Процесс плазменной газификации обеспечивает высочайшую степень очистки обрабатываемых материалов до 99,99 % и выше.

Продуктами плазменной газификации является высококалорийный горючий газ (смесь $H_2 + CO$) и нейтральный твердый остаток в виде стекловидного шлака. Шлаковый расплав может быть гранулирован и направлен в строительство, полученный металл также можно использовать вторично. Плазменная газификация значительно сокращает вес получаемого твердого вещества. Отношение веса материала отходов к золе твердого остатка достигает примерно 400 : 1.

Технологическая цепь этого способа утилизации состоит из следующих последовательных этапов (рис. 4.1) [170]:

- сортировка, предполагающая отбор цветных и черных металлов;
- дробление для получения однородных по размеру частиц;
- переработка (газификация) подготовленных отходов в реакторе; при этом в газе выделяются побочные химические соединения, содержащие хлор, азот, фтор, а также шлак, образующийся при расплавлении металлов, стекла, керамики;
- очистка газа в целях повышения его экологических свойств и энергоемкости, охлаждение и поступление его в скруббер для очистки щелочным раствором от загрязняющих веществ соединений хлора, фтора, серы, цианидов;
- метанирование и разделение потоков газовых смесей;
- разделение потоков газовых смесей.

Вместе с тем в плазменной технологии имеются определенные недостатки.

Нагрев материала осуществляется с помощью электродуговых плазмотронов, работающих как на инертных, так и кислородсодержащих газах. При этом образуются зона с экстремально высокими температурами в плазменной струе и зоны с более низкими температурами. Поскольку скорости реакций экспоненциально зависят от температуры, то нахождение обрабатываемого материала в разных температурных зонах обуславливает

большой разброс в скоростях переработки материалов и, соответственно, результатах процесса.

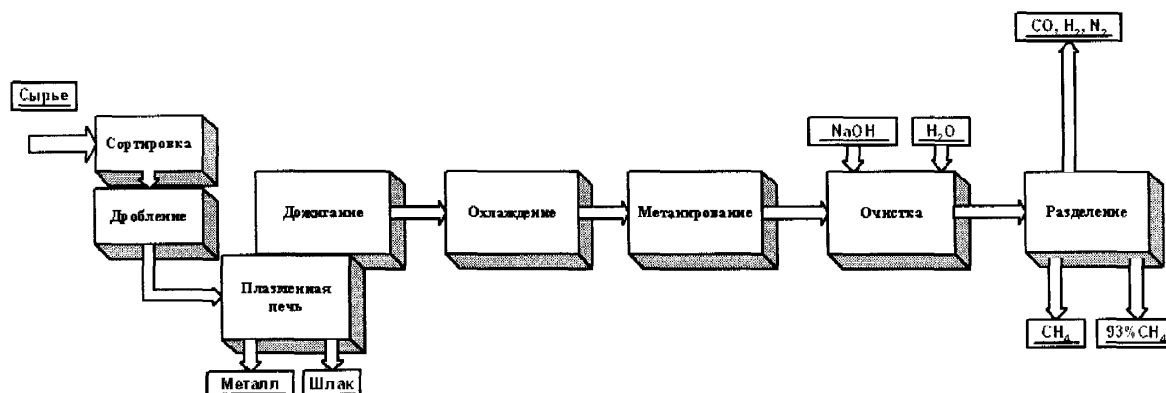


Рис. 4.1. Этапы утилизации твердых углеродсодержащих отходов с применением плазменной газификации

Плазменная технология предполагает большие затраты электроэнергии в отличие от обычного процесса высокотемпературного пиролиза, использующего в качестве топлива получаемый газ.

При производстве, связанном с непрерывным процессом переработки опасных отходов, возникают трудности с обеспечением длительной работы плазмотронов, имеющих весьма ограниченный реальный ресурс непрерывной работы. Ограничение ресурса обусловлено эрозионным износом электродов, которые требуют периодической замены.

Газ, образующийся в результате высокотемпературного пиролиза, содержит вредные компоненты, которые должны быть очищены перед дальнейшим его использованием. В состав газа входят диоксины, а также HCl, HF, SO₂ и др. Для удаления этих вредных веществ установка должна быть снабжена системой очистки газа.

Наиболее простые установки основаны на процессах сжигания или пиролиза отходов и использования полученного генераторного или синтез-газа для производства тепловой или электрической энергии.

В то же время рабочие циклы производства электроэнергии и суточной и годовой неравномерности ее потребления не совпадают, вследствие чего возникает проблема ее хранения. Такая проблема может быть решена путем создания технологии получения энергоносителей – жидких и газообразных, пригодных для хранения, накопления и транспортирования. В противном случае, такие установки не решают полностью экологическую проблему, т. к. в окружающую среду выбрасывают парниковые газы, как двуокись углерода.

В цели работы поставлена задача разработать экологически безопасную технологию утилизации твердых углеродсодержащих отходов, которая позволит избежать потерь, связанных с необходимостью выброса одновременно полезного топливного газа и в тоже время негативно влияющего на экологическую безопасность.

Это достигается тем, что перед газификацией в плазменном газогенераторе раздробленные твердые отходы производства подвергают термохимической газификации в связи с использованием топлива, после чего их дополнительно газифицируют в плазменном газогенераторе, при этом в термохимический и плазменный газогенератор вводят пары воды, из плазменного газогенератора металл и шлак отводят, а пирогаза дожигают в камерах дожигания плазмы, полученный газ охлаждают, метанируют, а после разделяют на потоки с разным содержанием метана, один из которых направляют для поддержания процессов в термохимическом газогенераторе в качестве топлива, а второй разделяют на компоненты и частично сжижают.

Все описанные выше особенности учтены при разработке технологии переработки твердых углеродсодержащих отходов, схема которой приведена рис. 4.2 [103, 170].

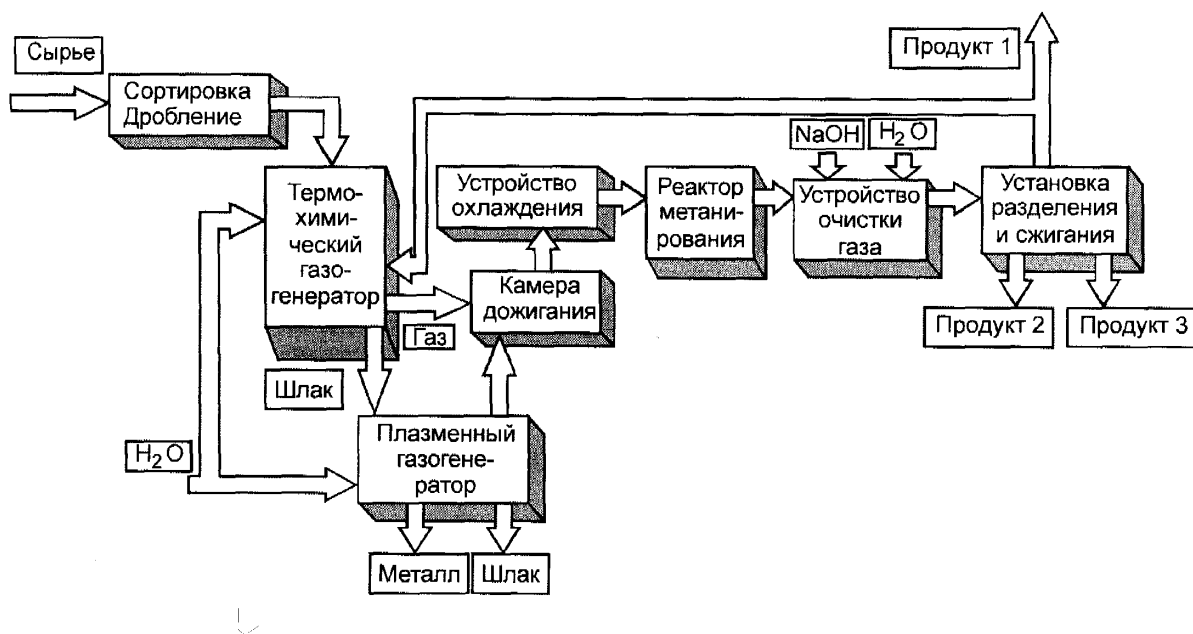


Рис. 4.2. Технологическая схема поэтапной высокотемпературной газификации твердых углеродсодержащих отходов, обеспечивающая их полную утилизацию

Данная технология с представленной последовательностью процессов позволяет утилизировать углеродсодержащие отходы и наряду с производством тепловой и электрической энергии получать газообразные или сжиженные топливные продукты, которые могут быть подвергнуты хранению и транспортировке. Разработанная с использованием данной технологии установка может быть автономна, не имеет ограничений по минимальному количеству обрабатываемого сырья и может работать как в непрерывном, так и периодическом режимах. Полученные продукты, содержащие метан, соответствуют требованиям ГОСТов и могут быть товаром.

Технология включает в себя следующие процессы: термохимическая газификация, плазменная обработка газов, резкое охлаждение, предварительная очистка, метанирование, окончательная очистка газов и низкотемпературное разделение синтез-газа на топливные продукты. При

этом в результате процесса получают продукты, которые могут быть непосредственно направлены на заправку автотранспорта, на хранение в газгольдеры или резервуары. Часть газа может быть использована для нужд отопления и получения электроэнергии.

Печь для смешанной газификации выполнена в виде двух камер, одна из которых является реактором газификации, а другая – плазменным реактором. В газификаторе осуществляется процесс высокотемпературной газификации токсичных отходов, позволяющий получить в качестве основного продукта газ определенного состава. Расплавленный металл выводится отдельно. Другой твердый продукт из газификатора (шлак) поступает для дальнейшей обработки в плазменный реактор и обрабатывается в струе плазмы. В результате получается экологически безопасная стекловидная масса. Вследствие того, что в плазменном реакторе обрабатывается не все сырье, а только его часть (не более 20 %), сокращается потребление электроэнергии.

В результате реакции пиролиза в плазменном реакторе получается синтез-газ, содержащий в основном окись углерода и водород. Этот газ может использоваться как топливный вместо метана для отопления и поддержания процесса пиролиза или газификации. Кроме того, синтез-газ может быть подвергнут дальнейшей обработке в целях получения продукта, пригодного для реализации.

Экологически эффективной данная технология может быть в случае предотвращения образования высокотоксичных веществ (таких, как диоксины) не только на этапе обработки (плазменной газификации) отходов, но и на выходе генераторного газа из плазменного реактора. Для снижения уровня диоксинов и фуранов при выходе генераторного газа из камеры плазменного реактора в процессе его охлаждения необходимо обеспечить резкое прохождение опасной области температур, при которой происходит повторная рекомбинация (образование) этих токсичных веществ.

4.2. Предотвращение повторного образования диоксинов во время охлаждения генераторного газа

Основной проблемой при термической обработке углеродсодержащих отходов является возможность образования диоксинов – кумулятивных ядов, относящихся к группе опасных ксенобиотиков. По уровню токсичности эти вещества превосходят все известные токсины. Они не разлагаются в окружающей среде десятки лет, накапливаются в верхнем слое почвы и попадают в организм человека в основном с пищей, водой и воздухом [218].

Известны такие механизмы образования диоксинов при термической переработке отходов [193]. Один состоит в неполном разложении диоксинов, которые образовались ранее и содержатся в окружающей среде; они поступают вместе с отходами, но из-за неполного разрушения при термической переработке снова попадают в атмосферу. Другой – это образование диоксинов в газовой фазе в пламени из углеводородов и хлоридов, таких, как фенол и HCl. Известен подобный этому механизм, когда образование диоксинов происходит на частично сгоревшем твердом топливе в зоне горения. Названным выше «высокотемпературным» механизмам формирования диоксинов противодействуют механизмы разрушения, поскольку диоксины не стабильны при температурах выше 800...850 °С. Существует также механизм повторного формирования диоксинов, или *de novo*, который наблюдается в дымовых газах на частицах летучей золы в диапазоне температур 300...450 °С. При такой температуре, когда конкурирующие процессы разрушения диоксинов протекают очень медленно, может происходить каталитическое формирование диоксинов. К факторам их формирования относятся скорость охлаждения газов в «опасном» диапазоне температур и присутствие кислорода.

При температуре плазменной струи полностью разрушаются любые органические и биологические материалы, гарантировано уничтожаются токсичные вещества. После выхода генераторного газа из плазменного

реактора происходит его охлаждение, ввиду отсутствия источника нагрева, а, следовательно, и формирование диоксинов по *de novo*. Температура генераторного газа на выходе из плазменного реактора после дожигания составляет около 1200 °С. Таким образом, предотвратить процесс повторного формирования диоксинов возможно путем резкого охлаждения генераторного газа до безопасной температуры 300 °С.

Распространенным способом охлаждения нагретого воздуха для поддержания требуемого температурного режима, в силу своей дешевизны и низкой энергозатратности, является испарительное охлаждение. В основе такого охлаждения лежит использование большой удельной теплоты испарения воды. Существенное снижение температуры охлаждаемого воздуха достигается за счет фазового перехода воды в пар, и при этом затраты энергии значительно меньше, чем при компрессионном охлаждении.

Для решения проблемы с повторным образованием диоксинов в технологии утилизации предусмотрено прямое испарительное охлаждение для снижения температуры генераторного газа с помощью удельной теплоты испарения, изменяя жидкое состояние воды на газообразное.

Таким образом, устройство охлаждения (см. рис. 4.2) представляет собой испарительный теплообменник, в котором применяются центробежные форсунки, обеспечивающие впрыскивание диспергированной жидкости в поток горячего воздуха, выходящего из плазменного реактора. Для обеспечения экологической безопасности технологического процесса утилизации требуется организации рациональной пространственной структуры водного аэрозоля и выработки на этой основе эффективных конструктивных решений. Технологически процесс утилизации опасных отходов организован таким образом, что после дожигания в плазменном реакторе температура газа составляет 1200 °С. Резкое охлаждение этого газа может быть достигнуто впрыском воды, диспергированной центробежными форсунками.

Таким образом, приходится иметь дело с двухфазной многокомпонентной средой с фазовым превращением, так как частицы воды в газовом потоке с высокой температурой будут испаряться. Требуемые конструктивные решения такой оросительной системы могут быть получены при организации эффективной пространственной структуры водного аэрозоля, а, следовательно, углубленном исследовании процессов течения и тепломассообмена двухфазной многокомпонентной среды.

При проектировании устройств охлаждения, работающих по принципу оросительных систем, целесообразно использовать численное моделирование физических процессов газокapельного потока. Это позволяет получать целостную картину распределения полей температур, массовой доли водяного пара в контрольных сечениях газоотводной трубы и других параметров потока.

4.2.1. Математическое моделирование процесса охлаждения в испарительном теплообменнике генераторного газа, полученного при утилизации углеродсодержащих отходов

Наиболее универсальное теоретическое описание процессов течения и тепломассообмена двухфазной многокомпонентной среды с фазовым превращением (испарением) в газоотводящей трубе возможно на основе непосредственного применения законов сохранения массы и количества движения к неоднородной по компонентному и фазовому составу среде, включающей генераторный газ, водяные капли и водяной пар. Математической формой записи законов сохранения для вязкого газа (пара) являются уравнения Навье – Стокса, для капель – уравнение баланса действующих на каплю сил, уравнивающего ее инерцию с равнодействующей сил тяжести и аэродинамического сопротивления. Эти уравнения в области произвольной формы с заданными условиями

однозначности могут быть совместно решены современными численными методами, выделившимися в самостоятельную отрасль знаний – вычислительную аэрогидродинамику.

Физико-математическая постановка задачи заключается в следующем. Основные соотношения физико-математической постановки задачи используют классический подход движения двухфазного потока. При математическом описании газодисперсной среды были приняты следующие основные допущения:

- течение газовой фазы несжимаемое, турбулентное;
- турбулентность изотропная;
- капли сферические, испаряющиеся;
- объемом, занимаемым каплями, пренебрегали.

Взаимодействие фаз учитывалось с помощью модели «капля – источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие частиц в потоке проявлялось через дополнительные источники в осредненных по Рейнольдсу уравнениях неразрывности, сохранения импульса (Навье – Стокса), энергии и массовой доли компонентов, замыкавшихся полуэмпирической моделью турбулентности k - ε типа.

4.2.2. Математическая модель газовой фазы

Для математического моделирования газовой фазы использован классический подход описания процессов течения и теплообмена двухфазной многокомпонентной среды с фазовым превращением (испарением) в газоотводящей трубе. Он основан на непосредственном применении законов сохранения массы и количества движения к неоднородной по компонентному и фазовому составу среде. Математической формой записи законов сохранения для вязкого газа (пара) являются уравнения Навье – Стокса.

При математическом описании газодисперсной среды были приняты следующие основные допущения:

- течение газовой фазы – несжимаемое, турбулентное;
- турбулентность – изотропная.

С учетом ряда введенных допущений квазистационарное существенно дозвуковое течение газовой фазы может быть описано системой осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса [119], включающей в себя уравнение неразрывности, уравнения сохранения импульса, энергии, два уравнения дифференциальной модели турбулентности k-ε-типа [275], уравнение сохранения массовых долей химических компонентов и уравнение состояния смеси идеальных газов:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_m; \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho \bar{g} = S_{fi}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (4.2)$$

$$\rho \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} = S_q; \quad (4.3)$$

$$\rho \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho(G - \varepsilon) = 0; \quad (4.4)$$

$$\rho \frac{\partial u_j \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \rho(C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} = 0; \quad (4.5)$$

$$\rho \frac{\partial u_j Y_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = S_i; \quad (4.6)$$

$$p = R \rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}; \quad (4.7)$$

где u_j – компоненты вектора осредненной скорости смеси; x_j – декартовы координаты; ρ – плотность смеси; p – давление смеси; τ_{ij} – компоненты тензора напряжений,

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

где μ – динамическая вязкость смеси; $\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ – турбулентная вязкость смеси; k , ε – удельные кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации соответственно; h – удельная энтальпия смеси,

$$h = \sum_i Y_i \left(\Delta h_{fi}^0 + \int_{T^0}^T c_{pi}(T) dT \right);$$

где Y_i – массовая доля химического компонента i ; Δh_{fi}^0 – удельная энтальпия образования химического компонента i ; T – температура смеси; T^0 – стандартная температура; c_{pi} – удельная теплоемкость химического компонента i при постоянном давлении; Pr – число Прандтля; Pr_T – турбулентное число Прандтля; G – член, который характеризует генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений,

$$G = \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

где Sc – число Шмидта; Sc_T – турбулентное число Шмидта; R – универсальная газовая постоянная; M_i – молекулярная масса химического компонента i ; S_m , S_{fi} , S_q , S_i – соответственно источники массы, импульса,

теплоты и концентрации химических компонентов, которые обусловлены межфазным взаимодействием.

Граничные условия. Система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) (4.1) – (4.6) дополняется соответствующими граничными условиями для независимых переменных.

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия непрерывной фазы: на входе в газоотводящую трубу – массовый расход генераторного газа ($G_r = 60$ кг/ч), температура генераторного газа ($t_r = 1200$ °С) и интенсивность турбулентности ($I_r = 10$ %), на выходе из газоотводящей трубы – нулевое избыточное статическое давление парогазовой смеси, на стенках – условие прилипания, аппроксимируемое эмпирической пристеночной функцией.

Непосредственное применение условия прилипания требует модификации модели турбулентности в пристеночной области, где турбулентная вязкость близка к молекулярной, и значительного измельчения расчетной сетки вблизи стенки. Опыт численного моделирования трехмерных течений показывает, что сложность геометрической формы расчетной области часто приводит к тому, что именно потребная размерность расчетной сетки становится тем критическим параметром, который определяет возможность проведения вычислительного эксперимента на располагаемой технической базе. Поэтому вместо условия прилипания для описания турбулентного пограничного слоя используются функции стенки – набор полуэмпирических функций, связывающих значения независимых переменных в центре пристеночной расчетной ячейки (точке Р) со значениями соответствующих переменных на стенке и базирующихся на предположении Лаундера и Сполдинга [276].

Закон стенки для осредненной скорости имеет вид

$$U^* = \begin{cases} y^* & \text{при } y^* \leq 11,225; \\ \frac{1}{K} \ln(Ey^*) & \text{при } y^* > 11,225, \end{cases} \quad (4.8)$$

где K – постоянная Кармана; E – эмпирическая постоянная.

Безразмерные параметры U^* и y^* определяются выражениями

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho}; \quad y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu}, \quad (4.9)$$

где U_P – осредненная скорость газа в точке P ; k_P – кинетическая энергия турбулентности в точке P ; τ_w – напряжение трения на стенке; ρ – плотность газа; y_P – расстояние от точки P до стенки; μ_x – динамическая вязкость.

Уравнение (4.4) переноса кинетической энергии турбулентности k решается во всей расчетной области, включая пристеночные ячейки.

Граничное условие для k , задаваемое на стенке, имеет вид $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$, где n –

локальная координата, нормальная к стенке.

Генерация кинетической энергии турбулентности G и скорость ее диссипации ε , которые входят в источниковый член уравнения (4.4), в пристеночных ячейках рассчитываются на основе гипотезы о локальном равновесии. При этом допущении генерация кинетической энергии турбулентности и скорость ее диссипации в пристеночном контрольном объеме полагаются одинаковыми. В результате уравнение (4.5) для ε в пристеночных ячейках не решается, вместо этого определяется

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{k_{uP}}, \quad (4.10)$$

где k – эмпирическая постоянная.

В общем случае в рабочей зоне движется двухфазный поток, содержащий генераторный газ и полидисперсный водный аэрозоль. Данная математическая модель описывает только газовую фазу. Она необходима в дальнейшем для оценки межфазного взаимодействия диспергированной жидкости и газового потока в газоотводящем канале. Поскольку газовая фаза оказывает воздействие на дисперсную фазу, следует учитывать и обратное влияние дисперсной фазы на континуум. Это двухстороннее взаимодействие учитывается поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся.

Таким образом, для создания эффективной оросительной системы охлаждения дымовых газов, образованных при утилизации отходов, требуется учет движения дисперсной фазы и межфазного взаимодействия.

4.2.3. Математическая модель дисперсной фазы

Основные соотношения физико-математической постановки задачи используют классический подход движения двухфазного потока. В общем случае в рабочей зоне движется двухфазный поток, содержащий генераторный газ и полидисперсный водный аэрозоль. Так как объемная концентрация водяных капель в потоке невелика, можно рассматривать движение невзаимодействующих капель различных размеров в отдельности.

В отношении дисперсной фазы принимаем следующие основные допущения:

- дисперсная фаза представляет собой полностью распыленный факел жидкости (воды), состоящий из конечного множества испаряющихся сферических капель различных диаметров;

- всеми силами, действующими на каплю, кроме сил тяжести и аэродинамического сопротивления, пренебрегаем;
- процессами вторичного дробления и коагуляции капель пренебрегаем.

При сделанных выше допущениях поведение дисперсной фазы (капель воды) удобно рассматривать в лагранжевом описании. Для распыленных жидкостей общепринятым распределением капель по размерам считается выражение Розина – Раммлера. Весь диапазон начальных размеров капель делится на определенное число дискретных интервалов; каждый из них представляется средним начальным диаметром, для которого выполняется траекторный расчет. При этом каждая моделируемая капля фактически представляет собой «пакет» капель с одинаковыми траекториями.

Если распределение капель по размерам описывается формулой Розина – Раммлера, то массовая доля капель с диаметром, большим d , определяется по формуле

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}, \quad (4.11)$$

где \bar{d} – средний медианный диаметр капель в распыле, соответствующий значению $Y_d = e^{-1} \approx 0,368$; n – параметр распределения.

Движение частицы дисперсной фазы (капли) описывается основным уравнением динамики (вторым законом Ньютона). При сделанных выше допущениях уравнение движения одиночной капли в векторной форме имеет вид

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{G} + \vec{F}_R, \quad (4.12)$$

где m_p – масса капли; \vec{u}_p – скорость капли; t – время; \vec{G} – сила тяжести:

$$\vec{G} = m_p \vec{g}, \quad (4.13)$$

где \vec{g} – ускорение свободного падения; \vec{F}_R – сила аэродинамического сопротивления капли:

$$\vec{F}_R = 0,5 \cdot C_R A_p \rho |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p), \quad (4.14)$$

где C_R – коэффициент аэродинамического сопротивления капли; A_p – площадь миделевого сечения капли; ρ – плотность газа; \vec{u} – скорость газа.

Подставляя выражения (4.13) и (4.14) в уравнение (4.12) и учитывая, что масса сферической капли и площадь ее миделевого сечения определяются выражениями:

$$m_p = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6}, \quad (4.15)$$

$$A_p = 0,25 \pi d_p^2, \quad (4.16)$$

и спроецировав векторы обеих частей уравнения (4.12) на оси неподвижной декартовой системы координат, получим систему уравнений движения капли в виде

$$\frac{du_{pj}}{dt} = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} g_j - \frac{3\rho C_R}{4\rho_p d_p} (u_{pj} - u_j) \left[\sum_j (u_{pj} - u_j)^2 \right], \quad (4.17)$$

где, $j = 1, 2, 3$.

Для расчета траектории капли систему (4.17) следует дополнить следующими очевидными уравнениями

$$\frac{dx_{pj}}{dt} = u_{pj}, j = 1, 2, 3, \quad (4.18)$$

где x_j – декартовы координаты капли.

При умеренных значениях относительных скоростей движения капель, когда сжимаемостью можно пренебречь, коэффициент аэродинамического сопротивления C_R сферической капли является однозначной функцией относительного числа Рейнольдса, определяемого как

$$Re_p = \frac{\rho d_p |\bar{u} - \bar{u}_p|}{\mu}, \quad (4.19)$$

где d_p – диаметр капли; μ – динамическая вязкость газа.

Для аппроксимации зависимости $C_R(Re_p)$ использована эмпирическая формула Чжена – Тризека [110]

$$C_R = \frac{24}{Re_p} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_p}} + 0,27. \quad (4.20)$$

Тепломассообмен капель описывается двумя моделями: испарения и кипения. Модель испарения действует до тех пор, пока температура капли не достигнет точки кипения $T_{бр}$. При достижении точки кипения тепломассообмен капли определяется скоростью кипения.

Модель испарения предполагает, что скорость испарения капли определяется законом Фика

$$\frac{dm_v}{dt} = A_v D \rho \frac{dc}{dr}, \quad (4.21)$$

где m_v – масса пара; t – время; A_v – площадь поверхности испарения; D – коэффициент бинарной диффузии пара в газе; ρ – плотность газа; c – объемная концентрация пара; r – радиальная координата.

Разделив переменные и проинтегрировав уравнение (4.21) с граничными условиями: $c = c_s$ при $r = r_p$; $c = c_\infty$ при $r = \infty$, получим

$$\frac{dm_v}{dt} = \beta A_v \rho (c_s - c_\infty), \quad (4.22)$$

где c_s – объемная концентрация пара у поверхности капли; r_p – радиус капли; c_∞ – объемная концентрация пара в окружающем газе; β – коэффициент испарения, определяемый экспериментально.

Результаты экспериментальных исследований обычно представляют в виде критериальных зависимостей $Sh(Re, Sc)$, где Sh – число Шервуда, определяемое как:

$$Sh = \frac{\beta d_p}{D}, \quad (4.23)$$

С учетом (4.23) и того, что площадь испарения сферической капли $A_v = \pi d_p^2$, уравнение (4.22) принимает вид:

$$\frac{dm_v}{dt} = Sh \rho D \pi d_p^2 (c_s - c_\infty). \quad (4.24)$$

Для аппроксимации критериальной зависимости $Sh(Re, Sc)$ использована эмпирическая формула Ранца – Маршалла [234]

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{0,5} Sc^{0,33}. \quad (4.25)$$

Концентрация пара на поверхности капли вычисляется, исходя из предположения, что парциальное давление пара на поверхности равно давлению насыщенного пара p_{sat} при температуре капли T_p

$$c_s = \frac{M_v p_{sat}}{M_v p_{sat} + M(p - p_{sat})}, \quad (4.26)$$

где M и M_v – молекулярные массы газа и пара соответственно; p – абсолютное давление парогазовой смеси.

Уравнение для скорости уменьшения диаметра испаряющейся капли можно получить, продифференцировав уравнение (4.24) по времени:

$$\frac{dm_p}{dt} = 0,5\pi\rho_p d_p^2 \frac{d(d_p)}{dt}, \quad (4.27)$$

С учетом очевидного соотношения $\frac{dm_p}{dt} = -\frac{dm_p}{dt}$ из (4.24) и (4.27)

окончательно получим:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = -\frac{2Sh\rho D}{\rho_p d_p} (c_s - c_\infty). \quad (4.28)$$

Температура капли изменяется до достижения ею температуры кипения в соответствии с балансом тепла, определяемым уравнением

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha A_v (T_\infty - T_p) + L \frac{dm_v}{dt}, \quad (4.29)$$

где c_p – теплоемкость капли; α – коэффициент теплоотдачи между каплей и газом, определяемый экспериментально; A_v – площадь поверхности капли; L – скрытая теплота испарения; T_∞ – локальная температура газа; T_p – температура капли.

Результаты экспериментальных исследований обычно представляют в виде критериальных зависимостей $Nu(Re, Pr)$, где Nu – число Нуссельта, определяемое как:

$$Nu = \frac{\alpha \lambda d_p}{\lambda}, \quad (4.30)$$

где λ – теплопроводность газа.

С учетом (4.24) и (4.30) уравнение (4.29) можно представить в виде

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{(T_\infty - T_p)}{\Theta} + \frac{Q_L}{\Theta}, \quad (4.31)$$

где

$$Q = \frac{LSh\rho D(c_s - c_\infty)}{Nu\lambda}, \quad (4.32)$$

$$\Theta = \frac{\rho_p d_p^2 c_p}{6Nu\lambda}, \quad (4.33)$$

Исходя из допущения о полной аналогии между тепло- и массообменом для определения числа Нуссельта для аппроксимации критериальной зависимости $Nu(Re, Pr)$ использована зависимость, аналогичная формуле (4.25)

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}, \quad (4.34)$$

Когда температура капли достигает точки кипения, вместо уравнения (4.28) применяется уравнение скорости кипения

$$\frac{d(d_p)}{dt} = -\frac{4\lambda}{\rho_p c_{p\infty} d_p} \left(1 + 0,23 Re_p^{0,5} \ln \left[1 + \frac{c_{p\infty} (T_\infty - T_p)}{L} \right] \right), \quad (4.35)$$

где $c_{p,\infty}$ – теплоемкость газа.

Уравнение (4.35) выведено в предположении стационарного течения при постоянном давлении. Считается, что пока применяется закон кипения, капля сохраняет постоянную температуру.

Таким образом, поведение одиночной капли в известном газодинамическом поле описывается системой дифференциальных уравнений (4.17), (4.18), (4.28), (4.31), (4.35). В этой системе искомыми функциями являются проекции абсолютной скорости капли u_{pj} , ее координаты x_{pj} , диаметр d_p и температура T_p . Остальные величины являются параметрами. Часть из этих параметров функционально связана с независимыми переменными. Поэтому для замыкания системы ее необходимо дополнить алгебраическими соотношениями (4.11), (4.19), (4.20) (4.23), (4.25), (4.26), (4.30), (4.34), а также зависимостями, выражающими зависимость теплофизических свойств капли от ее температуры.

Начальные условия. Для численного решения системы дифференциальных уравнений (4.17), (4.18), (4.28), (4.31), (4.35) необходимо задать начальные условия, то есть значения независимых переменных в начальный момент времени $t = 0$: u_{pj0} , x_{pj0} , d_p и T_p .

При моделировании полагалось, что капли стартуют через три (по количеству форсунок) ввода типа «кромка конуса»: точки В старта капель равномерно распределены по окружности радиуса r с центром в точке А (рис. 4.3).

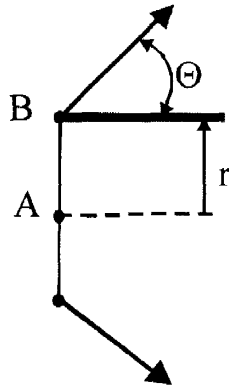


Рис. 4.3. Схема ввода капель

Начальные диаметры представительных капель d_p задавались по гистограмме начального распределения капель по размерам, построенной с помощью уравнения (4.11).

Начальная скорость капель полагалась равной скорости истечения жидкости из сопла форсунки. Начальная температура капель полагалась равной $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Начальное направление вектора начальной скорости капель определялось по значению корневого угла факела распыливания.

4.2.4. Математическая модель межфазного взаимодействия

Взаимодействие между фазами учитывается с помощью дискретной модели «частица – источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие капли в потоке проявляется через дополнительные источники в уравнениях сохранения сплошной фазы [257]. Во время расчета траекторий капель

отслеживаются импульс, масса и теплота, приобретаемые или теряемые «пакетом» каплей, следующих вдоль данной траектории. Затем эти значения включаются в расчет газовой фазы в виде источниковых членов S_m , S_q , S_f в уравнениях газовой динамики. Поскольку газовая фаза уже оказывает воздействие на дисперсную фазу через уравнения (4.17), (4.18), (4.28), (4.31), (4.38), учитывается и обратное влияние дисперсной фазы на континуум. Это двухстороннее взаимодействие учитывается поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся. Схема такой модели межфазного взаимодействия показана на рис. 4.4.

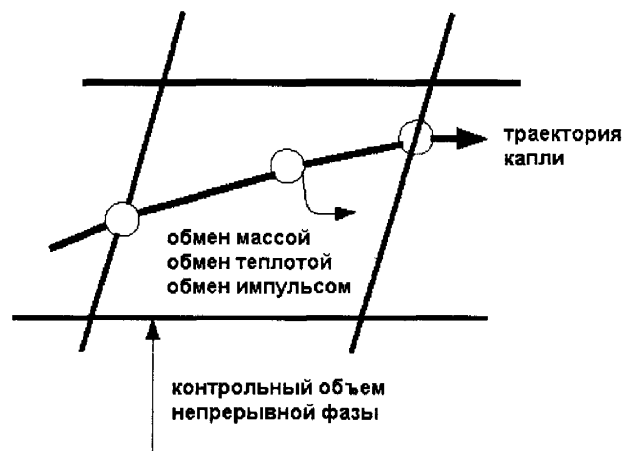


Рис. 4.4. Схема межфазного взаимодействия

Обмен массой. Перенос массы от дисперсной фазы к непрерывной фазе рассчитывается путем оценки изменения массы капли при ее прохождении через каждый контрольный объем геометрической модели. Это изменение массы рассчитывается как

$$\Delta S_m = \sum \left(\frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \cdot \dot{m}_{p0} \right), \quad (4.36)$$

где Δm_p – изменение массы капли в контрольном объеме; m_{p0} – начальная масса капли; \dot{m}_{p0} – начальное значение массового расхода капель.

Обмен импульсом. Перенос импульса от непрерывной фазы к дисперсной фазе вычисляется путем оценки изменения импульса капли при ее прохождении через каждый контрольный объем геометрической модели. Это изменение импульса рассчитывается как:

$$\Delta S_{fi} = \Sigma \left(\frac{2\mu C_R Re_p}{3\rho_p d_p^2} (u_{pi} - u_i) \cdot \dot{m}_p \Delta t \right), \quad (4.37)$$

где \dot{m}_p – массовый расход пара от капли; Δt – шаг по времени.

Теплообмен. Перенос тепла от непрерывной фазы к дисперсной фазе рассчитывается путем оценки изменения энтальпии капли при ее прохождении через каждый контрольный объем геометрической модели. Это изменение рассчитывается как:

$$\Delta S_q = \Sigma \left(\frac{\bar{m}_p}{m_{p0}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \left(-L + \int_{T_0}^{T_p} c_{pi}(T) dT \right) \right) \cdot \dot{m}_{p0}, \quad (4.38)$$

где \bar{m}_p – средняя масса капли в контрольном объеме; c_p – теплоемкость капли; ΔT_p – изменение температуры капли в контрольном объеме; L – скрытая теплота испарения; c_{pi} – теплоемкость пара топлива; T_p – температура капли на выходе из контрольного объема; T_0 – стандартная температура для энтальпии.

Численное интегрирование газовой фазы, дисперсной фазы и межфазного взаимодействия проводится для определенного фрагмента пространства (расчетной области), в пределах которого должна быть достигнута требуемая температура газового потока.

4.3. Теоретические вопросы метанирования и очистки газовой смеси после ее охлаждения

В результате реакции пиролиза в плазменном реакторе получается синтез-газ, содержащий в основном окись углерода и водород.

Газ, получаемый из реакторов газификации, проходит очистку с целью удаления H_2S , HCl , HF , SO_2 . Система очистки включает в себя:

- впрыск раствора NaOH для очистки от HCl , HF , SO_2 ;
- очистку газа от мелкодисперсных твердых частиц с помощью водоэмульсионного фильтра;
- очистку от сероводорода, которая осуществляется гидратом оксида железа либо активированным углем.

Суть предлагаемого способа очистки заключается в том, что газ пропускают через твердую сыпучую массу, содержащую $\text{Fe}(\text{OH})_3$. При этом сероводород вступает в реакцию с $\text{Fe}(\text{OH})_3$, образуя Fe_2S_3 и FeS . Одновременно в газ подается небольшое количество воздуха, который окисляет серу, содержащуюся в Fe_2S_3 и FeS , и образует гидрат окиси железа.

Кроме того, он имеет малое содержание метана и большое содержание азота. Этот газ может использоваться как топливный для поддержания процесса пиролиза или газификации. Кроме того, синтез-газ может быть подвергнут дальнейшей обработке в целях получения продукта, пригодного для реализации.

В настоящее время известны технологии «газ–жидкость», использующие процесс Фишера–Тропша для преобразования синтез-газа в жидкое топливо. Конечными продуктами реакции являются парафины, олефины и кислородсодержащие соединения – спирты, альдегиды, кетоны, кислоты и эфиры. Такая технология предполагает дальнейшую переработку полученного продукта с использованием процессов, применяемых на нефтеперерабатывающих заводах.

Известны также многостадийные процессы Мобил, TIGAS, заключающиеся в получении из синтез-газа метанола, диметилового эфира (ДМЭ) и далее – бензина или дизтоплива.

Кроме того, имеется одностадийный процесс CEOSIN, протекающий в одну стадию по последовательно-параллельным реакциям.

Такие установки рассчитаны на большую производительность для обеспечения рентабельности.

Разработаны также технологии, использующие процесс метанирования для преобразования синтез-газа в газообразный метан посредством экзотермических реакций окиси и двуокиси углерода с водородом. Однако ввиду сложности обеспечения нужного соотношения реагирующих компонентов для полного их преобразования в метан состав полученного топливного газа не соответствует требованиям стандартов и не может быть товарным продуктом.

Таким образом, получение жидкого синтетического топлива и газообразных топливных продуктов возможно с помощью:

– процесса Фишера–Тропша, в результате которого из синтез-газа получают смеси углеводородов (олефины, парафины, церезины, и кислородсодержащие соединения – спирты, альдегиды, кетоны, кислоты и эфиры). Это процесс восстановительной олигомеризации, происходящий в присутствии катализатора с содержанием металлов VIII группы – Fe, Co и Ru, в котором монооксид углерода CO и водород H₂ преобразуются в различные жидкие углеводороды. Данный процесс хорошо зарекомендовал себя в крупномасштабных проектах по получению синтетических моторных топлив и других продуктов из газов, газификации угля, но плохо подходит для малых производств. Получаемый продукт требует дальнейшего обогащения. Это накладывает определенные ограничения на экономически обоснованную минимальную мощность единичной установки;

– процесса «Мобил», основанного на получении метанола, диметилового эфира (ДМЭ) и высокооктанового бензина из синтез-газа. Этот

процесс, так же как и предыдущий, достаточно сложный для получения конечного товарного продукта, которым является топливо для заправки автотранспорта;

– осуществления процесса метанирования, то есть процесса получения газовых продуктов посредством обогащения синтез-газа метаном. Для этого в процессе метанирования вводят водяной пар при использовании щелочного или никелевого катализатора. Поскольку реакция метанирования экзотермична, она может обеспечить теплом процесс газификации в целом и избавить от необходимости сжигания части сырья для ее поддержания. При этом содержание метана увеличивается благодаря наличию в синтез-газе окиси и двуокиси углерода.

Температура протекания типичной реакции метанирования составляет 200...400 °С, т. е. она ниже, чем в процессе газификации.

Применение катализаторов при высокой температуре приводит к их быстрой дезактивации, преимущественно из-за интенсивного закоксовывания продуктами разложения смолистых веществ, выделяющихся при термическом разложении сырья.

В качестве катализатора может быть использован как промышленный катализатор, так и мартеновский шлак, прошедший специальную активацию, который также проявляет довольно высокую активность в метанировании.

Достаточно низкая температура процесса газификации исключает плавление металла на первой ступени переработки, но в то же время способствует образованию вредных веществ в шлаке и газе. При этой температуре образуется небольшое количество жидких продуктов, которые также поступают на дальнейшую переработку в плазменную камеру. Плазменная дообработка сырья исключает образование смолистых и токсичных веществ, что способствует увеличению срока работы катализаторов.

В результате процесса метанирования при использовании катализатора с эффективностью 40 % может быть получен газ примерно такого состава: CH_4 – 34,77%, H_2 – 1,44%, CO – 25,55%, N_2 – 5,11%, водяной пар – 33,13%.

Далее требуется осушивание с целью исключения из состава газа водяного пара. Очищенный газ с повышенным содержанием метана после его метанирования направляется в установку низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей для получения энергоносителя, пригодного для хранения.

4.4. Теоретические вопросы низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей, полученных при газификации отходов

После обогащения метаном газ подается в энерготехнологическую установку (ЭТУ) низкотемпературного разделения полученных многокомпонентных углеводородных смесей [140, 231]. В результате процесса разделения образуется сжиженный метан, сжиженный метан-содержащий газ и топливный газ для отопления, получения электроэнергии или поддержания процесса газификации в термохимическом газогенераторе.

Разработанная схема блока низкотемпературного разделения газовой смеси с повышенным содержанием метана показана на рис. 4.5.

Общая технологическая схема процесса получения полезного продукта в виде топлива может быть описана следующей последовательностью.

Газ после очистки от вредных примесей и сероводорода осушивается в блоке адсорбционной осушки (на схеме не показан). Далее происходит процесс сжатия в компрессоре КО-1 с последующим охлаждением в аппарате воздушного охлаждения АВО-1 до температуры окружающей среды. В последующем газ разделяется на три потока и направляется в

теплообменники ТО-1, ТО-2, ТО-3 для охлаждения обратными потоками продуктов.

После объединения всех трех потоков газ поступает в сепаратор С-1, где отделяется жидкая фаза. Затем давление полученного жидкого продукта в насосе Н-1 поднимается до 22 МПа.

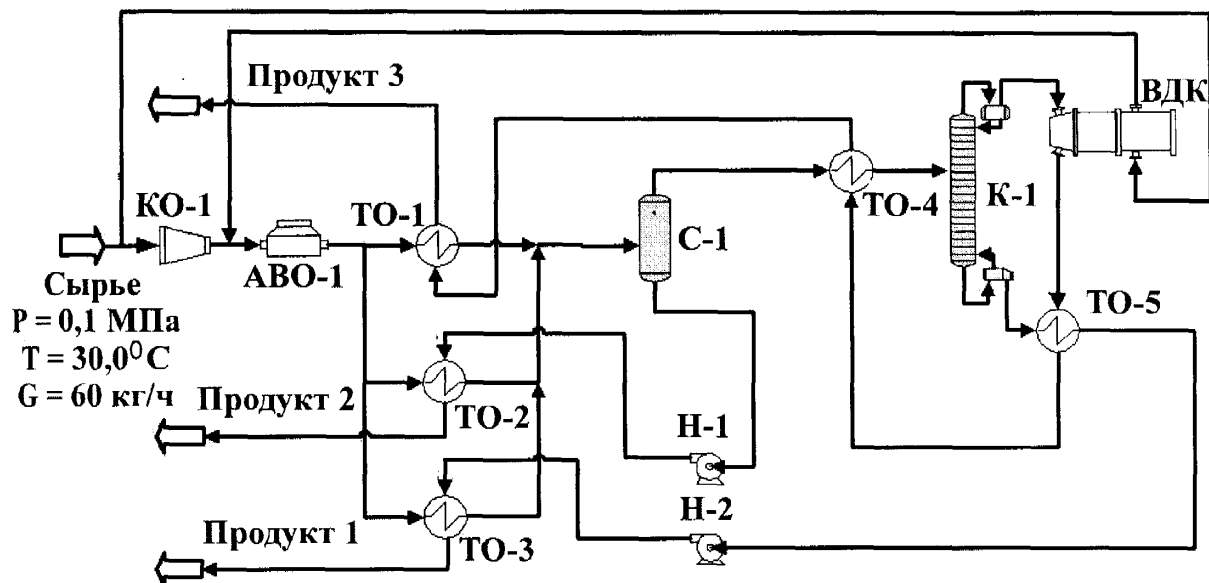


Рис. 4.5. Схема ЭТУ для разделения многокомпонентных газовых смесей: КО-1 – компрессор; АВО-1 – аппарат воздушного охлаждения; ТО-1, ТО-2, ТО-3, ТО-4, ТО-5 – теплообменник; Н-1, Н-2 – насос; С-1 – сепаратор; К-1 – ректификационная колонна; ВДК – волновой детандер-компрессор

Газообразная фаза из сепаратора С-1 охлаждается в теплообменнике ТО-4 и поступает на ректификационную колонну К-1. Из конденсатора колонны в верхней части отбирается газообразный продукт, представляющий собой смесь CO , H_2 и N_2 . Этот газ, проходя через детандерную часть волнового детандер-компрессора (ВДК), совершает работу расширения, которая используется для сжатия части исходного газа параллельно компрессору КО-1. В обратном потоке этот газ проходит через теплообменники ТО-5, ТО-4 и ТО-1, охлаждая последовательно продукт и

прямой поток входящего газа. Из ребойлера ректификационной колонны К-1 отбирается продукт, обогащенный метаном, который сжимается насосом до давления 22 МПа и подогревается в теплообменнике ТО-3, после чего в виде компримированного газа может использоваться, например, для заправки автомобилей.

Для достоверного расчета параметров блока низкотемпературного разделения требуется разработка математических моделей отдельных функциональных элементов.

Математическая модель энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных углеводородных смесей включает систему уравнений, описывающих процессы в функциональных элементах энерготехнологической установки, а также связи между этими элементами. Уравнения, описывающие параметры отдельных функциональных элементов, объединяются в системы уравнений, являющиеся математическими моделями этих функциональных элементов:

- турбодетандер;
- рекуперативный теплообменник;
- теплообменник-охладитель (аппарат воздушного охлаждения);
- насос;
- компрессор;
- сепаратор;
- ректификационная колонна.

Для возможности реализации сложных схем введены следующие вспомогательные элементы:

- разделитель потока;
- смеситель.

В качестве исходных параметров и допущений было принято следующее:

1. Величина недорекуперации в теплообменниках, разность температур потоков в пинч-точке (минимальная), $\Delta T_{\text{мин}} = 5 \text{ К}$;
2. Температура окружающей среды $T_{\text{о.с.}} = 298 \text{ К}$.
3. Изоэнтروпийный КПД детандера, $\eta_{\text{д}} = 60\%$;
4. Изоэнтропийный КПД насоса, $\eta_{\text{н}} = 75\%$.
5. Изоэнтропийный КПД компрессора, $\eta_{\text{к}} = 75\%$;
6. Величина гидравлических потерь в элементах блока низкотемпературного разделения газа принимается равной нулю.
7. Теплообменом функциональных элементов схемы и соединительных трубопроводов с окружающей средой пренебрегаем.

При расчете параметров многофазных многокомпонентных потоков используется комплект подпрограмм расчетов коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, базирующийся на уравнении состояния Пенга-Робинсона.

4.4.1. Математическая модель расчета насоса

Расчет насоса для сжатия теплоносителя до давления в испарителе сводится к определению потребной мощности привода насоса и температуре на выходе из насоса.

Мощность насоса определяется из соотношения

$$N_{\text{п}} = \frac{H_{\text{н}} \cdot Q_{\text{т}}}{\eta_{\text{п}}}, \quad (4.39)$$

где $H_{\text{н}} = P_1 - P_2$ – напор, создаваемый насосом; P_1, P_2 – давление на входе и на выходе насоса; $Q_{\text{т}}$ – объемный расход перекачиваемого насосом теплоносителя; $\eta_{\text{п}}$ – адиабатический коэффициент полезного действия насоса.

Для насоса, работающего на постоянных оборотах, напорная характеристика может выглядеть в виде полинома:

$$H_H = A_H + B_H \cdot Q_T + C_H \cdot Q_T^2 + D_H \cdot Q_T^3 + \dots,$$

где A_H , B_H , C_H , D_H – коэффициенты полинома, характеризующие напорную характеристику данной модели насоса.

Аналогично представляется характеристика КПД насоса:

$$H_H = a_H + b_H \cdot Q_T + c_H \cdot Q_T^2 + d_H \cdot Q_T^3 + \dots,$$

где a_H , b_H , c_H , d_H – коэффициенты полинома, характеризующие КПД данной модели насоса.

Для расчета температуры теплоносителя на выходе из насоса используется соотношение

$$N_P = M_T \cdot (i_T(P_2, T_2) - i_T(P_1, T_1)), \quad (4.40)$$

где i_T – энтальпия теплоносителя при заданных давлении P и температуре T ,
 M_T – расход перекачиваемого насосом теплоносителя.

$$M_T = Q_T \cdot \rho_T,$$

где ρ_T – плотность теплоносителя.

4.4.2. Математическая модель расчета детандера

Для расчета детандера используется адиабатная модель, в которой в качестве исходных данных используются давление и температура потока на входе в детандер, давление на выходе из детандера, расход рабочего тела и адиабатный коэффициент полезного действия детандера.

Энтальпия идеального процесса расширения определяется из условия адиабатного расширения потока:

$$i_{T2_ИД} = i_T(P_2, S_1), \quad (4.41)$$

где S_1 – удельная энтальпия потока на входе в детандер, определяемая по известным входным температуре T_1 и давлению P_1 .

Тогда мощность, получаемая в идеальном детандере при адиабатном процессе расширения

$$N_{ИД_ДЕТ} = (i_{T2_ИД} - i_T(P_1, T_1)) \cdot M_T. \quad (4.42)$$

Действительная полезная мощность, снимаемая с вала детандера

$$N_{РЕАЛ_ДЕТ} = N_{ИД_ДЕТ} \cdot \eta_{ДТ}. \quad (4.43)$$

Энтальпия на выходе из детандера в реальном процессе (с учетом потерь) определяется как

$$i_T(P_4, T_4) = i_T(P_3, T_3) - \frac{N_{РЕАЛ_ДЕТ}}{M_T}, \quad (4.44)$$

Данные соотношения позволяют рассчитать температуру газа на выходе из детандера.

4.4.3. Математическая модель расчета рекуперативного теплообменника

Математическая модель расчета рекуперативного теплообменника в наиболее общем случае предполагает существование как прямого, так и обратного потока в жидком, двухфазном и паровом состоянии. Решение частных задач допускает более простые случаи относительного фазового состояния теплоносителей. Поэтому для расчета рекуперативного теплообменника при принятых нами допущениях производится его условное расчленение по потоку на две секции: в первой секции прямой поток теплоносителя прогревается до температуры насыщения (температуры в пинч-точке), во второй секции теплоноситель меняет свое фазовое состояние и перегревается. Аналогично для обратного потока происходит охлаждение паровой фазы до температуры конденсации, затем теплоноситель конденсируется и продолжает охлаждаться в виде жидкости. Дополнительные сложности связаны со свойствами многокомпонентных сред. В частности, температура испарения (или конденсации) однокомпонентного рабочего тела при постоянном давлении является величиной постоянной, тогда как для многокомпонентной смеси в ходе испарения или конденсации происходит изменение температуры процесса. Таким образом, при расчете рекуперативного теплообменника с фазовыми переходами теплоносителей обязательным является нахождение положения пинч-точки, определяемое температурой и давлением каждого из теплоносителей на входе в теплообменник, а также расходом теплоносителей.

Для каждой из частей записывается система уравнений.

Для первой секции:

$$Q_{ISP1} = M_{\Pi} \cdot (i_{\Pi}(T_{\Pi_PP}) - i_{\Pi}(T_{\Pi_IN})), \quad (4.45)$$

$$Q_{ISP1} = M_{O} \cdot (i_{O}(T_{O_PP}) - i_{O}(T_{O_EX})) \quad (4.46)$$

$$Q_{ISP1} = k_{ISP1} \cdot F_{ISP1} \cdot \overline{\Delta T_{ISP1}} \quad (4.47)$$

где T_{Π_PP} , T_{O_PP} – температуры соответственно прямого и обратного потоков теплоносителей в пинч-точке; T_{Π_IN} – температура прямого потока на входе в рекуперативный теплообменник; T_{O_EX} – температура обратного потока на выходе из рекуперативного теплообменника; M_{Π} , M_{O} – расход прямого и обратного потока теплоносителей; F – площадь теплообменной поверхности; k – средний коэффициент теплопередачи теплообменника, принимается из литературных источников; i_{Π} – удельная энтальпия теплоносителя прямого потока при заданной температуре T ; i_{O} – удельная энтальпия теплоносителя обратного потока при заданной температуре T ; $\overline{\Delta T}$ – среднее значение температурного напора теплообменника.

Индекс $ISP1$ обозначает секцию испарителя, в которой осуществляется подогрев теплоносителя до температуры насыщения.

Так как в данном расчете не задаются геометрические параметры теплообменников, то площадь F уточняется в процессе итераций заданном k . Цель расчета – получить достоверное (или приемлемое с технической точки зрения) значение площади F .

Температура прямого потока теплоносителя в пинч-точке определяется как температура насыщения при известном давлении прямого потока P_{Π} (или как температура начала процесса испарения для многокомпонентного потока):

$$T_{\Pi_PP} = T_{T_SAT}(P_{\Pi}) \quad (4.48)$$

Соответственно температура обратного потока в пинч-точке определяется как

$$T_{O_PP} = T_{П_PP} + \Delta T_{MIN} \quad (4.49)$$

Для нахождения величины среднего значения температурного напора теплообменника используется следующее соотношение

$$\overline{\Delta T}_{ISP1} = \frac{(T_{O_PP} - T_{П_PP}) - (T_{O_EX} - T_{П_IN})}{\ln \frac{T_{O_PP} - T_{П_PP}}{T_{O_EX} - T_{П_IN}}}. \quad (4.50)$$

Система уравнений для второй секции имеет аналогичный вид:

$$Q_{ISP2} = M_{П} \cdot (i_{П}(T_{П_EX}) - i_{П}(T_{П_PP})), \quad (4.51)$$

$$Q_{ISP2} = M_{O} \cdot (i_{O}(T_{O_IN}) - i_{O}(T_{O_PP})) \quad (4.52)$$

$$Q_{ISP2} = k_{ISP2} \cdot F_{ISP2} \cdot \overline{\Delta T}_{ISP2} \quad (4.53)$$

Индекс ISP2 обозначает секцию рекуперативного теплообменника, в которой осуществляется испарение и перегрев прямого потока теплоносителя.

Для нахождения величины среднего значения температурного напора теплообменника используется следующее соотношение

$$\overline{\Delta T}_{ISP2} = \frac{(T_{O_IN} - T_{П_EX}) - (T_{O_PP} - T_{П_PP})}{\ln \frac{T_{O_IN} - T_{П_EX}}{T_{O_PP} - T_{П_PP}}}. \quad (4.54)$$

4.4.4. Математическая модель теплового расчета теплообменника-охладителя (аппарата воздушного охлаждения)

При разработке математической модели расчета аппарата воздушного охлаждения (АВО) предполагается, что прямой поток охлаждаемого теплоносителя может быть в паровом, двухфазном и жидком состояниях. Однако обратный поток охлаждающего воздуха не меняет свое фазовое состояние, оставаясь в газообразном состоянии. Для расчета АВО при принятых ранее допущениях [231] производится его условное расчленение на три секции: в первой секции прямой поток теплоносителя охлаждается до температуры насыщения (температуры в пинч-точке), во второй секции происходит конденсация теплоносителя, в третьей секции – дальнейшее переохлаждение жидкой фазы теплоносителя. В обратном потоке охлаждающего воздуха происходит его нагрев без изменения фазового состояния. Дополнительные сложности связаны со свойствами многокомпонентных сред. В частности, температура конденсации однокомпонентного рабочего тела при постоянном давлении является величиной постоянной, тогда как для многокомпонентной смеси в ходе испарения или конденсации происходит изменение температуры процесса. Таким образом, при расчете АВО обязательным является нахождение положения пинч-точки, определяемое температурой и давлением каждого из теплоносителей на входе в АВО, а также расходом теплоносителей.

Для каждой из частей записывается система уравнений.

Для первой секции:

$$Q_{\text{АВО1}} = M_{\text{ТП}} \cdot (i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП_IN}}) - i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП_PP}})), \quad (4.55)$$

$$Q_{\text{АВО1}} = M_{\text{ВОЗД}} \cdot (i_{\text{ВОЗД}}(T_{\text{ВОЗД_EX}}) - i_{\text{ВОЗД}}(T_{\text{ВОЗД_PP}})), \quad (4.56)$$

$$Q_{\text{АВО1}} = k_{\text{АВО1}} \cdot F_{\text{АВО1}} \cdot \overline{\Delta T_{\text{АВО1}}}, \quad (4.57)$$

где $T_{\text{ТП_PP}}$, $T_{\text{ВОЗД_PP}}$ – температуры теплоносителя и охлаждающего воздуха в пинч-точке соответственно; $T_{\text{ТП_IN}}$ – температура потока теплоносителя на входе в АВО; $T_{\text{ВОЗД_EX}}$ – температура охлаждающего

воздуха на выходе из АВО; $M_{ТП}$, $M_{ВОЗД}$ – массовые расходы теплоносителя и охлаждающего воздуха соответственно; F – площадь теплообменной поверхности секции АВО; k – средний коэффициент теплопередачи секции АВО (берется из литературных источников); $i_{ТП}$ – удельная энтальпия теплоносителя прямого потока при заданной температуре T ; $i_{ВОЗД}$ – удельная энтальпия охлаждающего воздуха заданной температуры T ; $\Delta T_{АВО1}$ – среднее значение температурного напора в секции АВО, при этом индекс 1 обозначает секцию АВО, в которой осуществляется охлаждение теплоносителя до температуры насыщения.

Поскольку в данном расчете не задаются геометрические параметры теплообменников, площадь F уточняется в процессе итераций при заданном среднем коэффициенте теплопередачи секции k .

Температура прямого потока теплоносителя в пинч-точке определяется как температура насыщения при известном давлении прямого потока $P_{ТП}$ (или как температура начала процесса конденсации для многокомпонентного потока):

$$T_{ТП_PP} = T_{COND_BEGIN}(P_{ТП}). \quad (4.58)$$

Соответственно температура обратного потока в пинч-точке определяется таким образом:

$$T_{ВОЗД_PP} = T_{ТП_PP} - \Delta T_{MIN}. \quad (4.59)$$

Для нахождения величины среднего значения температурного напора первой секции АВО используется следующее соотношение:

$$\overline{\Delta T_{ABO1}} = \frac{(T_{\text{ТП_IN}} - T_{\text{ВОЗД_EX}}) - (T_{\text{ТП_PP}} - T_{\text{ВОЗД_PP}})}{\ln\left(\frac{(T_{\text{ТП_IN}} - T_{\text{ВОЗД_EX}})}{(T_{\text{ТП_PP}} - T_{\text{ВОЗД_PP}})}\right)}. \quad (4.60)$$

Система уравнений для второй секции имеет аналогичный вид:

$$Q_{ABO2} = M_{\text{ТП}} \cdot (i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП_PP}}) - i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП_CS}})), \quad (4.61)$$

$$Q_{ABO2} = M_{\text{ВОЗД}} \cdot (i_{\text{ВОЗД}}(T_{\text{ВОЗД_PP}}) - i_{\text{ВОЗД}}(T_{\text{ВОЗД_CS}})), \quad (4.62)$$

$$Q_{ABO2} = k_{ABO2} \cdot F_{ABO2} \cdot \overline{\Delta T_{ABO2}}, \quad (4.63)$$

где $T_{\text{ТП_CS}}$ – температура потока теплоносителя на выходе из второй секции (температура, соответствующая завершению процесса конденсации при давлении потока теплоносителя); $T_{\text{ВОЗД_CS}}$ – температура потока охлаждающего воздуха на входе во вторую секцию.

Индекс АВО2 обозначает секцию АВО, в которой осуществляется конденсация теплоносителя.

Для нахождения величины среднего значения температурного напора второй секции АВО используется следующее соотношение:

$$\overline{\Delta T_{ABO2}} = \frac{(T_{\text{ТП_CS}} - T_{\text{ВОЗД_CS}}) - (T_{\text{ТП_PP}} - T_{\text{ВОЗД_PP}})}{\ln\left(\frac{(T_{\text{ТП_CS}} - T_{\text{ВОЗД_CS}})}{(T_{\text{ТП_PP}} - T_{\text{ВОЗД_PP}})}\right)}. \quad (4.64)$$

Система уравнений для третьей секции будет иметь вид

$$Q_{ABO3} = M_{\text{ТП}} \cdot (i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП_CS}}) - i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП_EX}})), \quad (4.65)$$

$$Q_{ABO3} = M_{\text{ВОЗД}} \cdot (i_{\text{ВОЗД}}(T_{\text{ВОЗД_CS}}) - i_{\text{ВОЗД}}(T_{\text{ВОЗД_IN}})), \quad (4.66)$$

$$Q_{ABO3} = k_{ABO3} \cdot F_{ABO3} \cdot \overline{\Delta T_{ABO3}}. \quad (4.67)$$

где $T_{\text{ТП_EX}}$ – температура потока теплоносителя на выходе из АВО;
 $T_{\text{ВОЗД_IN}}$ – температура потока охлаждающего воздуха на входе в АВО.

Индекс АВО3 обозначает секцию АВО, в которой осуществляется переохлаждение теплоносителя.

Для нахождения величины среднего значения температурного напора третьей секции АВО используется выражение

$$\overline{\Delta T_{\text{АВО3}}} = \frac{(T_{\text{ТП_CS}} - T_{\text{ВОЗД_CS}}) - (T_{\text{ТП_EX}} - T_{\text{ВОЗД_IN}})}{\ln \left(\frac{(T_{\text{ТП_CS}} - T_{\text{ВОЗД_CS}})}{(T_{\text{ТП_EX}} - T_{\text{ВОЗД_IN}})} \right)}. \quad (4.68)$$

Решение системы уравнений (4.55) – (4.68) позволяет определить температуры теплоносителя $T_{\text{ТП_EX}}$ и охлаждающего воздуха $T_{\text{ВОЗД_EX}}$ на выходе из АВО при заданном соотношении массовых расходов теплоносителя и воздуха.

При описании процессов используется гидравлическая модель потоков, в том числе двухфазного внутри труб, при следующих основных допущениях:

- течение обоих потоков одномерное, стационарное;
- допускается частичная конденсация движущегося внутри труб газа;
- в поперечном сечении трубы жидкость и пар находятся в термическом равновесии;
- имеет место проскальзывание фаз;
- учитываются гидравлические потери в коллекторах, при входе и выходе потока газа;
- параметры газа в коллекторах однородны и отвечают их осредненным значениям;

- расход теплоносителя в трубном пучке одного хода распределяется так, чтобы падение давления в каждом слое труб было одинаковым;
- влияние структуры двухфазного потока на гидродинамику и теплообмен учитывается введением карты режимов течения.

Режимы течения охлаждаемого газа внутри труб. При тепловом и гидродинамическом расчете потоков в каналах выбор аналитических и статистических расчетных соотношений определяется режимом течения. В рассматриваемой задаче охлаждаемый теплоноситель может находиться в газообразном состоянии и в виде смеси газа с конденсатом. Поэтому ниже рассматриваются возможные режимы однофазного и двухфазного потока в горизонтальных каналах, а также определяются критерии смены режимов.

Для однофазного потока в трубах выделяют ламинарный, турбулентный и переходный режимы течения [91], критерием смены которых служит число Рейнольдса. Ламинарный режим реализуется при $Re < 2300$, турбулентный - при $Re > 104$. В ламинарном режиме по критерию Рэлея выделяют вязкостный ($Ra < 170$) и вязкостно-гравитационный режимы течения.

Для двухфазного потока в горизонтальных трубах широко используют карту режимов (КР) Бейкера и Шихта [201, 226, 289], где выделяют следующие основные режимы течения: расслоенный, снарядный, волновой, кольцевой, дисперсно-кольцевой, пузырьковый и пенистый. Критериями смены режимов служат параметры:

$$\frac{\gamma_l \cdot L \cdot \Psi}{\gamma_v} = \frac{1-x}{x} \cdot L \cdot \Psi; \quad (4.69)$$

$$\frac{\gamma_v}{L} = \frac{\gamma \cdot x}{L}, \quad (4.70)$$

где γ - массовая скорость двухфазного потока (массовый расход, отнесенный к единице площади поперечного сечения), кг/(м²с); x - массовая степень сухости.

Индексы l и v отмечают, соответственно, параметры жидкости и пара (газа). L и Ψ - нормирующие коэффициенты, базирующиеся на отношении теплофизических свойств рабочих тел к соответствующим теплофизическим свойствам воздуха, отмеченным индексом «а», и воды (индекс «w»):

$$L = \sqrt{\frac{\rho_v \cdot \rho_l}{\rho_a \cdot \rho_w}}; \quad (4.71)$$

$$\Psi = \frac{\sigma_w}{\sigma_l} \cdot \left[\frac{\eta_l}{\eta_w} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (4.72)$$

где ρ - плотность, η - динамическая вязкость, σ - поверхностное натяжение.

В [289] для горизонтальных двухфазных потоков с углом наклона канала к горизонтали $0 \leq \theta \leq 45^\circ$ используется КР, в которой критериями смены режимов течения являются объемное паро- или газосодержание $\square v$ и относительная скорость фаз $w_{lv} = w_v - w_l$ (рис. 4.6).

	$\alpha_{пс}$	$\alpha_{сск}$	$\alpha_{скдк}$	$\alpha_{дкл}$	α
w_{lv}	П	С	СК	ДК	Д
$w_{lvкр}$	ПР	СР	СДКР	ДКР	ДР
$0,5w_{lvкр}$	Р				

Рис. 4.6. Карта режимов двухфазного потока в горизонтальных каналах

Здесь выделяют следующие режимы потока: расслоенный (Р); пузырьковый (П); снарядный (С); дисперсно-кольцевой (ДК); дисперсный (Д); а также переходные режимы: между пузырьковым и расслоенным (ПР); снарядным и расслоенным (СР); снарядным и дисперсно-кольцевым (СДК); снарядным, дисперсно-кольцевым и расслоенным (СДКР); дисперсно-кольцевым и расслоенным (ДКР); дисперсным и расслоенным (ДР).

Значения критериев смены режимов здесь определяются следующим образом:

$$\alpha_{\text{пс}} = 0,25, \quad \text{при } G \leq 2000; \quad (4.73)$$

$$\alpha_{\text{пс}} = 0,25 + 0,00025 \cdot (G - 2000), \quad \text{при } 2000 < G < 3000; \quad (4.74)$$

$$\alpha_{\text{пс}} = 0,5, \quad \text{при } G \geq 3000. \quad (4.74)$$

$$\alpha_{\text{скс}} = 0,75, \quad (4.75)$$

$$\alpha_{\text{скдк}} = 0,8, \quad (4.76)$$

$$\alpha_{\text{дкд}} = 0,9999, \quad (4.76)$$

$$w_{\text{кр}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \alpha_v \cdot A}{\rho_v \cdot d_h \cdot \sin \theta}} \cdot (1 - \cos \theta), \quad (4.77)$$

где G – массовая скорость, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$, g – ускорение свободного падения; A – площадь поперечного сечения канала; d_h – его гидравлический диаметр; θ – угол, определяющий уровень жидкости при расслоенном течении (рис. 4.7), связанный с α_v соотношением:

$$\pi \cdot \alpha_v = \theta - \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (4.66)$$

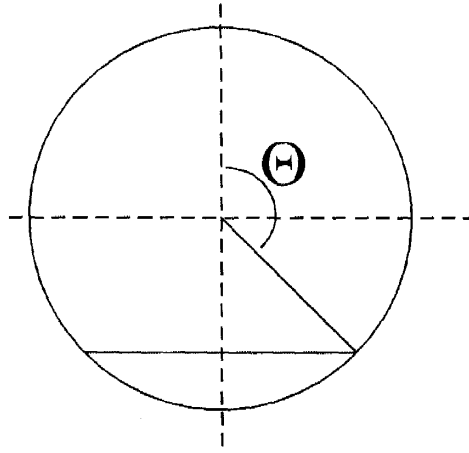


Рис. 4.7. Схематизация расслоенного течения в горизонтальном канале

При расчете теплоотдачи с конденсацией выделяют режимы с ламинарным и турбулентным движением пара и конденсата. При конденсации в трубах значение критического числа Рейнольдса конденсатной пленки может быть принято равным [91]

$$Re_{lzkz} = \frac{q_{zc} \cdot z}{\psi_{lv} \cdot \eta_l} = 200 \dots 300, \quad (4.78)$$

где q_{zc} – линейная плотность теплового потока к стенке, z – осевая координата, ψ_{lv} – удельная теплота испарения.

При конденсации в трубах, в зависимости от соотношения сил тяжести и трения, выделяют следующие режимы:

- силы тяжести существенно преобладают над динамическим воздействием пара и последний можно считать практически неподвижным;
- силы тяжести соизмеримы с силами трения;
- динамическое воздействие пара на пленку конденсата преобладает над силами тяжести.

В качестве критерия смены режимов можно использовать число Рейнольдса, построенное на так называемой скорости циркуляции [91]

$$w_{ц} = \frac{G}{\rho_l \cdot A} = \frac{4 \cdot G}{\rho_l \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (4.79)$$

где d - диаметр канала. Его критическое значение считают равным [201]

$$Re_{ц} = \frac{w_{ц} \cdot d}{\nu_l} = 5000. \quad (4.80)$$

Система основных уравнений. В соответствии с принятыми допущениями параметры теплоносителя в трубах описываются в рамках одномерной, стационарной, термически однородной и механически неравновесной модели.

$$G_m = \rho_m \cdot w_m \cdot A = \text{const}; \quad (4.81)$$

$$\frac{di_m}{dz} = q \cdot G_m; \quad (4.82)$$

$$\alpha_v \cdot \rho_v \cdot w_v \cdot \frac{dw_v}{dz} + (1 - \alpha_v) \cdot \rho_l \cdot w_l \cdot \frac{dw_l}{dz} + \frac{dp}{dz} + f_f = 0, \quad (4.83)$$

где G - расход через канал, с площадью поперечного сечения A ; α - объемное паросодержание; ρ - плотность; w - скорость; p - статическое давление; i - удельная энтальпия; f_f - сила трения о стенки канала; q - плотность теплового потока через стенку канала. Индексы l и v отмечают, соответственно, параметры жидкости и пара, m - параметры смеси в целом.

Для определения линейной плотности теплового потока через цилиндрическую стенку используется соотношение:

$$q_l = k_{тл} \cdot \pi \cdot (T_m - T_a), \quad (4.84)$$

где T_a и T_m – соответственно, температуры охлаждающего воздуха и охлаждаемого газа; $k_{\text{тл}}$ – линейный коэффициент теплопередачи, зависящий от интенсивности теплоотдачи внутри и снаружи трубы, ее геометрии и теплопроводности материала:

$$k_{\text{тл}} = d \cdot \left(\frac{1}{h_m} + d \cdot R_{w\Sigma} + \frac{1}{h_a \cdot \eta_p \cdot \varepsilon_A} \right)^{-1}, \quad (4.85)$$

где d – внутренний диаметр трубы; h_m и h_a , соответственно, коэффициенты теплоотдачи со стороны газа и воздуха; $R_{w\Sigma}$ – общее термическое сопротивление многослойной цилиндрической стенки; η_p – КПД ребра; $\varepsilon_A = A_{\text{рс}}/A$ – коэффициент увеличения площади поверхности трубы; $A_{\text{рс}}$ – площадь оребренной поверхности. Для гладких труб $\varepsilon_A = d_n/d$, где d_n – наружный диаметр трубы.

Замыкающие соотношения. В соответствии с постановкой прямой задачи при анализе рабочего процесса теплообменника все геометрические параметры проточной части обоих теплоносителей известны (или задаются).

Теплообмен при течении в трубах однофазного потока. Для ламинарного вязкостного режима течения местный коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле [200]

$$\text{Nu} = 3,66 \cdot \left(1 + 0,025 \cdot \frac{d}{z} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}^{\frac{5}{6}} \right)^{0,4} \cdot \varepsilon_t, \quad (4.86)$$

где ε_t – поправка, учитывающая изменение ТФС в тепловом погранслое, которая может быть определена как [289]

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} . \quad (4.87)$$

Для ламинарного вязкостно-гравитационного и переходного режимов течения коэффициент теплоотдачи можно определить по соотношению [200]

$$\text{Nu} = 0,037 \cdot \text{Re}^{0,75} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_c} \right)^n , \quad (4.88)$$

где n для случая течения с охлаждением потока принимается равным 0,25.

Для турбулентного течения коэффициент теплоотдачи определяют по выражению [91]

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43} \cdot \varepsilon_t^{0,25} , \quad (4.89)$$

или

$$\text{Nu} = \frac{C_f}{8} \cdot \frac{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \varepsilon_t}{1,07 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{C_f}{8}} \cdot \left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} , \quad (4.90')$$

где C_f - коэффициент поверхностного трения, определяемый соотношениями типа корреляции Блазиуса. Для турбулентного течения [91]

$$C_f = 0,316 \cdot \text{Re}^{-0,25} . \quad (4.91)$$

Тепломассообмен при конденсации в трубах. Для режима течения в горизонтальных трубах, когда силы тяжести превалируют над динамическим

воздействием пара, используются корреляции Чаддока и Чато. Общий коэффициент теплоотдачи в трубе

$$h = \frac{\theta}{\pi} \cdot h_t + \frac{\pi - \theta}{\pi} \cdot h_b. \quad (4.92)$$

Коэффициент теплоотдачи в верхней части трубы определяется по формуле

$$h_t = \beta \cdot \sqrt[4]{\frac{\psi_{lv} \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \lambda_l^3}{\eta_l \cdot d \cdot (t_{\text{sat}} - t_c)}}, \quad (4.93)$$

где β - параметр, зависящий от θ . При $\theta = 0^\circ$, $\beta = 0,9$; при $\theta = 120^\circ$, $\beta = 0,85$; при $\theta = 180^\circ$, $\beta = 0,7$.

Для режима течения, когда силы тяжести соизмеримы с динамическим воздействием пара, в [114] для локального коэффициента теплоотдачи рекомендовано выражение

$$\text{Nu} = 0,044 \text{Re}_{lz}^{0,88} \text{Pr}_l^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,46} \left(\frac{\eta_v}{\eta_l} \right)^{0,03} (1-x)^{0,9} x^{-0,2}. \quad (4.94)$$

Здесь и далее индексы «н» и «с» отмечают параметры на линии насыщения (конденсации) и у стенки, ν - кинематическая вязкость, $\text{Re}_{lz} = w_l \cdot z/\nu_l$.

Для режима течения с преобладанием динамического воздействия пара на пленку конденсата ориентация трубы в пространстве значения не имеет. Для такого режима местный коэффициент теплоотдачи можно определять по формуле Исаченко [91]

$$Nu = C Re_{ц}^{0,8} Pr_1^{0,43} \sqrt{1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)}. \quad (4.95)$$

Для среднего коэффициента теплоотдачи на участке с изменением массового паросодержания от x_1 до x_2 в [91] предлагается соотношение

$$\overline{Nu} = \kappa Re_{ц}^{0,8} Pr_1^{0,43} 0,5 \cdot \left[\sqrt{1 + x_1 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)} + \sqrt{1 + x_2 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)} \right] \quad (4.96)$$

Здесь κ - коэффициент, учитывающий материал трубы. Для стали он принимается равным 0,024, для латуни - 0,026, для меди - 0,032.

Определение градиента давления при движении теплоносителя в трубах. Для определения градиента давления в двухфазном потоке применяют модели раздельного и гомогенного течения, а также смешанные подходы. При динамической неравновесности фаз падение давления на участке трубы dz определяют по уравнению сохранения импульса двухфазной сжимаемой среды в виде (4.83), где сила сопротивления потоку, отнесенная к единице его объема, определяется касательным напряжением τ на стенке канала

$$f_f = \tau \cdot \frac{Pd_z}{Ad_z} = 2 \cdot C_f \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{d} = \frac{2 \cdot C_f}{\rho \cdot d} \cdot \left(\frac{G}{A} \right)^2. \quad (4.97)$$

Для ее нахождения, следуя общепринятому подходу [201, 206, 226], вводят параметр двухфазности, значение которого для $\alpha_v > 0,7$ можно определить из выражения [129, 206]

$$\Phi^2 = \left(\frac{\eta_v}{\eta_l} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,8} \cdot \left[1 + x \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} - 1 \right) \right]^{1,8}. \quad (4.98)$$

Тогда для силы трения смеси, отнесенной к единице объема, можно записать

$$f_f = \Phi^2 \cdot \frac{2 \cdot C_f}{\rho_l d} \cdot \left(\frac{G}{A} \right)^2. \quad (4.99)$$

При этом коэффициент поверхностного трения определяется числом Рейнольдса, построенным на скорости циркуляции потока (4.29).

Для расчета скоростей фаз можно использовать выражения

$$w_v = \frac{x}{\alpha_v} \cdot \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{\rho_v}; \quad (4.100)$$

$$w_l = \frac{(1-x)}{(1-\alpha_v)} \cdot \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{\rho_l}. \quad (4.101)$$

Объемное паросодержание и степень сухости связаны соотношением

$$\alpha_v = \frac{1}{1 + \frac{(1-x) \cdot \rho_v \cdot w_v}{x \cdot \rho_l \cdot w_l}}. \quad (4.102)$$

Используя (4.100 – 4.102) а также уравнения состояния фаз выражение (4.83) можно представить в виде

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\kappa_x \cdot \frac{dx}{dz} + \kappa_\alpha \cdot \frac{d\alpha}{dz} + \kappa_{T_1} \cdot \frac{dT_1}{dz} + \kappa_{T_v} \cdot \frac{dT_v}{dz} - f_{f2}}{1 - \kappa_p}, \quad (4.103)$$

где

$$\kappa_x = \frac{(1 - \alpha_v) \cdot \rho_l \cdot w_l^2}{1 - x} + \frac{\alpha \cdot \rho_v \cdot w_v^2}{x}; \quad (4.104)$$

$$\kappa_\alpha = \rho_v w_v^2 - \rho_l w_l^2; \quad (4.105)$$

$$\kappa_{T_1} = (1 - \alpha_v) \cdot w_l^2 \cdot \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial T_1} \right)_p; \quad (4.106)$$

$$\kappa_{T_v} = \alpha_v \cdot w_v^2 \cdot \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T_v} \right)_p; \quad (4.107)$$

$$\kappa_p = \alpha_v \cdot w_v^2 \cdot \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial p} \right)_{T_v} + (1 - \alpha_v) \cdot w_l^2 \cdot \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial p} \right)_{T_1}. \quad (4.108)$$

Теплоотдача при поперечном обтекании пучков гладких круглых труб. Коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании трубных пучков зависит от характера омывания трубок. Последний определяется схемой компоновки трубного пучка и местом расположения трубного ряда в пучке. Теплоотдача первого ряда определяется начальной турбулентностью потока, а второго и третьего рядов возрастает вследствие ее увеличения. Интенсивность теплоотдачи первого ряда составляет 60 % по отношению к третьему. Второго, соответственно, 90% для коридорных пучков и 70 % для шахматных [127, 200]. Начиная с третьего ряда, турбулентность потока имеет стабильный характер, присущий данной компоновке пучка. Вышесказанное справедливо как для гладких, так и для оребренных труб [121].

Средний по периметру гладкой трубы коэффициент теплоотдачи для трубок третьего и всех последующих рядов вычисляется на основе следующих корреляций.

Для коридорных пучков при $Re < 103$

$$Nu = 0,56 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,36} \cdot \varepsilon_t \quad \text{при } Re < 103; \quad (4.109)$$

$$Nu = 0,22 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,36} \cdot \varepsilon_t \quad \text{при } Re > 103; \quad (4.110)$$

Для шахматных пучков

$$Nu = 0,56 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,36} \cdot \varepsilon_t \quad \text{при } Re < 10^3; \quad (4.111)$$

$$Nu = 0,40 \cdot Re^{0,60} \cdot Pr^{0,36} \cdot \varepsilon_t \quad \text{при } Re > 10^3. \quad (4.112)$$

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи пучка используют формулу:

$$h_{\text{пуч}} = \frac{\sum h_j \cdot A_j}{\sum A_j}. \quad (4.113)$$

где h_j - средний коэффициент теплоотдачи j -го ряда; A_j - площадь поверхности теплообмена j -го ряда. При углах обтекания пучка, отличных от 90° вводят поправку

$$\varepsilon_\theta = 1 - 0,54 \cdot \cos^2 \theta, \quad (4.114)$$

В [200] для тех же условий теплообмена учитываются безразмерные (отнесенные к диаметру труб) поперечный $L1$ и продольный $L2$ шаг в пучке.

Для коридорных пучков при $L_1 \leq 1,25$; $L_2 \leq 1,25$; $10 < Re < 150$

$$Nu = 1,2 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_t, \quad (4.115)$$

при $1,24 < L_1 < 4$; $1,24 < L_2 < 4$; $103 < Re < 105$

$$Nu = 0,26 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \cdot L_1^{-0,15} \cdot \varepsilon_t, \quad (4.116)$$

а при $1,3 < L_1 < 2,5$; $1,3 < L_2 < 2,5$; $105 < Re < 106$; $0,7 < Pr < 500$

$$Nu = 0,02 \cdot Re^{0,84} \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_t. \quad (4.117)$$

Для шахматных пучков при $L_1 \leq 1,25$; $L_2 \leq 1,25$; $10 < Re < 200$

$$Nu = 1,2 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_t, \quad (4.118)$$

при $0,6 < L_1 < 4$; $1,3 < L_2 < 2,6$; $103 < Re < 105$; $0,7 < Pr < 500$

$$Nu = 0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_t; \quad (4.119)$$

при $0,9 < L_1 < 1,5$; $1,2 < L_2 < 2,5$; $105 < Re < 106$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,84} \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_t \quad (4.120)$$

Здесь для поправки ε_x используются формулы:

$$\varepsilon_x = (L_2 / L_1)^{1/6}, \quad \text{при } L_2 / L_1 < 2$$

$$\varepsilon_x = 1,12, \quad \text{при } L_2 / L_1 \geq 2. \quad (4.121)$$

Определяющим размером является наружный диаметр трубы. В число Re входит скорость потока в узком сечении ряда. Определяющей принимается температура жидкости перед соответствующим рядом.

Теплоотдача при поперечном обтекании пучков ребренных труб. Для расчета коэффициента теплоотдачи в пучках круглых труб с круглыми и квадратными ребрами, обтекаемых поперечным потоком газа, в диапазоне $3 < d/b < 4,8$; $3000 < Re_g < 25000$ можно использовать уравнение [91]

$$Nu = k \cdot Re^m \cdot (d_n / b)^{-0,54} \cdot (h / b)^{-0,14}, \quad (4.122)$$

где b - шаг ребер, d_n - наружный диаметр трубы (по основаниям ребер), h - высота ребра.

При определении числа Рейнольдса используется среднемассовая скорость газа w в узком сечении пучка площадью

$$A = \left(1 - \frac{1}{L_1} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{h}{b} \cdot \frac{\delta_p}{d} \right) \right) \cdot A_g. \quad (4.123)$$

где A_g - площадь свободного газохода (без пучка), δ_p - средняя толщина ребра. Определяющим размером является шаг ребер, определяющей температурой (величина $T_c \pm \Delta T_{\log}$, где T_c - температура стенки; ΔT_{\log} - среднелогарифмический температурный напор, k и m - постоянные.

Для коридорных пучков с круглыми ребрами $k=0,104$, с квадратными ребрами $k = 0,096$; в обоих случаях $m = 0,72$. Для шахматных пучков с

круглыми ребрами $k = 0,223$, с квадратными ребрами $k = 0,205$; в обоих случаях $m = 0,65$.

КПД прямых ребер постоянной толщины на плоской поверхности определяется по выражению

$$\eta_p = \text{th}((2 \cdot \text{Bi})^{0,5} \cdot h / \delta_p) / ((2 \cdot \text{Bi})^{0,5} \cdot h / \delta_p), \quad (4.124)$$

где δ_p - толщина ребра, $\text{Bi} = \alpha_2 \cdot \delta_p / \lambda_c$. Для круглых ребер КПД прямого ребра постоянной толщины умножают на поправку, определяемую по специальным графикам [202].

В [121] для расчета теплоотдачи оребренных труб предлагают следующие корреляции.

Для коридорных пучков при $5 < \varepsilon < 12$ и $5000 < \text{Re} < 10^5$

$$\text{Nu} = 0,3 \text{Re}^{0,625} \text{Pr}^{0,333} \varepsilon^{-0,375}, \quad (4.125)$$

где $\varepsilon = A_{\text{рс}} / A_{\text{н}}$, $A_{\text{н}}$ - площадь поверхности неоребреной трубы.

Для шахматных пучков при $100 < \text{Re} < 2 \cdot 10^4$

$$\text{Nu} = 0,19 \cdot \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0,18} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{-0,14} \cdot \text{Re}^{0,65} \text{Pr}^{0,33}. \quad (4.126)$$

Гидравлическое сопротивление пучка труб. Падение давления в трубном пучке определяется выражением

$$\Delta p = \text{Eu} \cdot \rho w^2, \quad (4.127)$$

а задача его нахождения сводится к выбору соответствующей корреляции для числа Эйлера.

Для расчета гидросопротивления гладкотрубных пучков в [202] приведены следующие выражения.

Для шахматных пучков при $\frac{1-1/L_{diag}}{L_1-1} \leq 0,53$

$$Eu = 1,4 \cdot (n+1) \cdot Re^{-0,25}; \quad (4.128)$$

при $\frac{1-1/L_{diag}}{L_1-1} > 0,53$

$$Eu = 1,93 \cdot (n+1) \cdot \sqrt{\frac{1-1/L_{diag}}{L_1-1}} \cdot Re^{-0,25}. \quad (4.129)$$

где $L_{diag} = \sqrt{\frac{L_1^2}{4} + L_2^2}$, L_1 , L_2 , соответственно, безразмерные диагональный, поперечный и продольный шаги трубного пучка, n – число рядов труб. Числа Эйлера и Рейнольдса определяются по скорости в узком сечении.

Для учета влияния изменения теплофизических свойств на гидросопротивление пучка используют соотношение

$$\Delta p_n = \Delta p + ((\rho w^2)_{out} - (\rho w^2)_{in}), \quad (4.130)$$

где in , out – индексы, которые относятся к входному и выходному сечению.

Формулы (4.77) - (4.78) справедливы при $6 \cdot 10^3 < Re < 6 \cdot 10^4$ и $\frac{1-1/L_{diag}}{L_1-1} = 0,25 \dots 2,5$.

Для расчета гидросопротивления коридорных пучков труб используют следующие зависимости.

$$\text{При } \frac{L_2 - 0,8}{L_1 - 1} \leq 1,$$

$$Eu = 0,265 \cdot \left(\frac{L_2 - 0,8}{L_1 - 1} \right)^{2,5} \cdot n \cdot Re^m. \quad (4.131)$$

$$\text{При } \frac{L_2 - 0,8}{L_1 - 1} > 1$$

$$Eu = 0,265 \cdot \left(\frac{L_2 - 0,8}{L_1 - 1} \right)^m \cdot n \cdot Re^m. \quad (4.132)$$

$$\text{При } L_1 \geq 1,24$$

$$m = 0,88 \cdot \left(\frac{L_1 - 1}{L_2 - 1} - 0,1 \right)^{0,138} - 1. \quad (4.133)$$

$$\text{При } L_2 < 1,24$$

$$m = 0,88 \cdot \left(\frac{L_2}{1,24} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{L_1 - 1}{L_2 - 1} - 0,1 \right)^{0,138} - 1. \quad (4.134)$$

Для пучков труб с кольцевыми ребрами в [21] приведены следующие корреляции.

Для коридорных пучков

$$Eu = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot w^2 \cdot n} = 0,52 \cdot \left(\frac{d_r}{d_h} \right)^{0,3} \cdot Re_{d_r}^{-0,08} \cdot \chi_n. \quad (4.135)$$

Для шахматных пучков

$$\text{При } 2,2 \cdot 10^3 < Re_{d_r} < 1,8 \cdot 10^5$$

$$Eu = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot w^2 \cdot n} = 5,4 \cdot \left(\frac{d_r}{d_h} \right)^{0,3} \cdot Re_{d_r}^{-0,25} \cdot \chi_n. \quad (4.136)$$

При $Re_{d_r} > 1,8 \cdot 10^5$

$$Eu = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot w^2 \cdot n} = 0,26 \cdot \left(\frac{d_r}{d_h} \right)^{0,3} \cdot \chi_n. \quad (4.137)$$

При этом относительный диаметр для коридорных пучков

$$d_r = \frac{d \cdot A_{tube}}{A_{tot}} + \frac{A_{fin}}{A_{tot}} \cdot \sqrt{0,5 A_{fin} / n_{fin}}, \quad (4.138)$$

для шахматных

$$d_r = \frac{d \cdot A_{tube}}{A_{tot}} + \frac{A_{fin}}{A_{tot}} \cdot \sqrt{0,785 \cdot (D^2 - d_H^2)}; \quad (4.139)$$

$$d_g = \frac{2 \cdot (b \cdot (l_1 - d) - 2 \cdot \delta_p \cdot h)}{2 \cdot h + b} - \text{гидравлический диаметр};$$

где n_{fin} , A_{tube} , A_{tot} и A_{fin} – соответственно, удельные (на единицу длины): количество ребер, площади поверхности неоребреной трубы, оребреной поверхности и ребер; d и D – соответственно, наружные диаметры трубы и ребер; b – шаг ребер, l_1 – поперечный шаг в пучке, h и δ_p – высота и толщина ребер. В число Рейнольдса входит скорость в узком сечении и относительный диаметр d_r . Поправка на малорядность пучка определяется по выражению

$$\chi_n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \kappa_j. \quad (4.140)$$

где для коридорных пучков

$$\kappa_j = 0,738 + \frac{1,509}{j - 0,250}; \quad (4.141)$$

для шахматных

$$\kappa_j = 0,934 + \frac{0,355}{j - 0,667}; \quad (4.142)$$

где n – число рядов труб в пучке.

Численный метод. При численном решении теплообменник разбивается на ряд участков в направлении движения потоков. Для охлаждаемого газа это участки вдоль труб, для воздуха - слои трубных пучков (рис. 4.8).

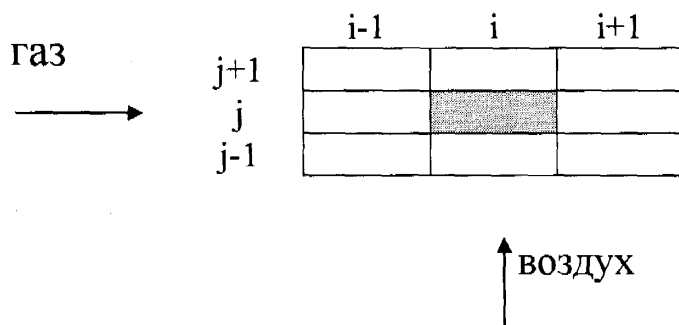


Рис. 4.8. Расчетная ячейка на координатной сетке

На каждом участке с учетом реальных свойств теплоносителей и конструкционных материалов, структуры двухфазного потока определяются тепловой поток и градиент давления, позволяющие вычислить параметры на входе в следующую по потоку ячейку.

Соответствующие уравнения записываются в конечноразностной форме:

$$i_{mi+1,j} - i_{mi,j} = q_{i,j} \cdot \Delta z / G_{mj}; \quad (4.143)$$

$$p_{i+1,j} - p_{i,j} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_{i,j} \cdot \Delta z, \quad (4.144)$$

где Δz – шаг по пространственной сетке вдоль трубы в направлении движения теплоносителя.

Для определения линейной плотности теплового потока q_i используется уравнения (4.84), (4.85). Градиент давления в трубах определяется по (4.103). По известным значениям теплового потока и градиента давления определяются энтальпия и давление на входе в следующую ячейку. По давлению и энтальпии охлаждаемого газа определяются равновесная степень сухости, состав и другие теплофизические и динамические характеристики двухфазного потока.

Параметры охлаждающего воздуха на участке длиной Δz определяются при переходе от одного трубного слоя к другому:

$$i_{ai,j+1} - i_{ai,j} = q_{i,j} n_j \Delta z / G_{1a}; \quad (4.145)$$

$$p_{i,j+1} - p_{i,j} = Eu \cdot \rho_{ai,j} w_{ai,j}^2, \quad (4.146)$$

где n_j – количество труб в j – том ряду; G_{1a} – удельный, на 1 м длины трубного пучка расход воздуха.

Решение задачи находится с использованием итерационного метода при предварительном задании произвольного распределения температур и давлений теплоносителей по пространственной сетке. Сходимость процесса контролируется по параметрам потоков на выходе из теплообменника. В результате расчета определяются параметры потоков в промежуточных сечениях и на выходе из теплообменника.

4.4.5. Математическая модель расчета компрессора

Для расчета компрессора используется адиабатная модель, в которой в качестве исходных данных используются давление и температура потока на входе в компрессор, давление на выходе из компрессора, расход рабочего тела и адиабатный коэффициент полезного действия компрессора.

Энтальпия идеального процесса сжатия определяется из условия адиабатного сжатия потока:

$$i_{T2_ИД} = i_T(P_2, S_1), \quad (4.147)$$

где S_1 – удельная энтальпия потока на входе в компрессор, определяемая по известным входным температуре T_1 и давлению P_1 .

Тогда мощность, получаемая в идеальном компрессоре при адиабатном процессе сжатия

$$N_{ИД_КОМП} = (i_{T2_ИД} - i_T(P_1, T_1)) \cdot M_T. \quad (4.148)$$

Действительная полезная мощность, снимаемая с вала детандера

$$N_{РЕАЛ_КОМП} = \frac{N_{ИД_КОМП}}{\eta_{КОМП}}. \quad (4.149)$$

Удельная энтальпия на выходе из компрессора в реальном процессе (с учетом потерь) определяется как

$$i_T(P_2, T_2) = i_T(P_1, T_1) + \frac{N_{РЕАЛ_КОМП}}{M_T}, \quad (4.150)$$

что дает возможность рассчитать температуру газа на выходе из компрессора.

Данный подход может быть реализован для оценочного расчета достижимых параметров схем энерготехнологических установок. При проведении конструкторских расчетов необходимо использовать более сложные модели.

4.4.6. Математическая модель процесса разделения многокомпонентных углеводородных смесей в ректификационной колонне

Разделение многокомпонентных углеводородных смесей с получением заданной доли какого-либо компонента может быть осуществлено в ректификационной колонне, включающей в себя тарельчатую секцию, ребойлер и конденсатор [3]. При этом исследуется заданный рекуперативный теплообменник с поперечным обтеканием охлаждающим воздухом одно- или многоходового (с поворотными коллекторами) горизонтального шахматного или коридорного пучка круглых гладких или оребренных труб и заданными параметрами на входе. Следовательно, анализ рабочего процесса рекуперативного теплообменника осуществляется в постановке прямой задачи [311, 312].

При расчете параметров многофазных многокомпонентных потоков используется комплект подпрограмм расчетов коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, базирующийся на уравнении состояния Пенга-Робинсона [91, 201, 286].

Сложность процессов, происходящих в ректификационной колонне, не позволяет создать детальную и при этом относительно простую математическую модель расчета ректификационной колонны. Поэтому для описания функционирования ректификационной колонны используется модель черного ящика.

На входе в ректификационную колонну задается многокомпонентный двухфазный поток с известными температурой T_{PK_IN} , давлением P_{PK_IN} и расходом G_{IN} . При известном компонентном составе потока комплект подпрограмм расчета коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел позволяет получить массовый и мольный состав паровой и жидкой фаз подводимого потока на входе в ректификационную колонну, а также удельную энтальпию входящего многокомпонентного двухфазного потока.

Для математической модели ректификационной колонны используются ранее принятые допущения [231]:

- величина гидравлических потерь в ректификационной колонне принимается равной нулю;
- теплообменом конструктивных элементов ректификационной колонны (тарельчатой секции, ребойлера и конденсатора) пренебрегаем;
- давление в кубе колонны принимается больше, чем давление в конденсаторе;
- величина давления подачи продукта к ректификационной колонне находится между этими двумя величинами;
- для регулирования компонентного состава отводимых продуктов осуществляется подвод теплоты в ребойлере, отвод теплоты в конденсаторе.

Для ректификационной колонны записывается следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}
 G_{IN} &= G_{L_EX} + G_{V_EX}, \\
 G_{IN} \cdot i_m(P_{PK_IN}, T_{PK_IN}) &= G_{L_EX} \cdot i_m(P_{L_EX}, T_{L_EX}) + \\
 &+ Q_{PB} + G_{V_EX} \cdot i_m(P_{V_EX}, T_{V_EX}) - Q_{KOND},
 \end{aligned} \quad (4.151)$$

где G_{L_EX} , G_{V_EX} – расходы однофазных жидкого и газообразного продуктов на выходе из ректификационной колонны; i_m – удельная энтальпия многокомпонентной смеси, определяемая с помощью комплекта

компонента с требуемой точностью. После этого производится расчет теплопритоков в ребойлере $Q_{РБ}$ и конденсаторе $Q_{КОНД}$, а также массовых расходов жидкой и газовой фаз. На этом процесс расчета ректификационной колонны можно считать завершенным.

4.4.7. Математическая модель расчета смесителя

Смеситель потоков рабочего тела предназначен для объединения массовых расходов рабочих тел с целью выравнивания давления и температуры. Для описания работы функционального элемента используется следующий алгоритм.

1. Суммарный расход продукта на выходе из смесителя равен сумме расходов продуктов на входе в смеситель.

$$m_{\Sigma} = m_1 + m_2 + \dots + m_i, \quad (4.153)$$

где m_{Σ} – суммарный расход на выходе из смесителя, m_1, m_2, \dots, m_i – расходы теплоносителей на входе в смеситель.

2. Давление продукта на выходе из смесителя принимается равным давлению продукта на входе, имеющему минимальное значение.

3. При расчете температуры продукта после смешения принимается допущение об адиабатном дросселировании потоков, имеющих повышенное по отношению к выходному значению давление; при расчете выходной температуры рассчитывается через энтальпию суммарного потока на выходе из смесителя

$$i(T_{ex}) = \frac{m_1 \cdot i(T_{in1_dr}) + m_2 \cdot i(T_{in2_dr}) + \dots + m_i \cdot i(T_{in_i_dr})}{m_{\Sigma}}, \quad (4.154)$$

где T_{in_dr} – температура i -го компонента после адиабатного дросселирования.

Запись формулы в виде (4.101) позволяет использовать ее в случае смешения потоков разного состава.

4.4.7. Создание математической модели энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей

Для расчета стационарного режима работы энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей записывается системы уравнений материального и энергетического баланса. На базовой схеме представим контрольные сечения (рис. 4.9).

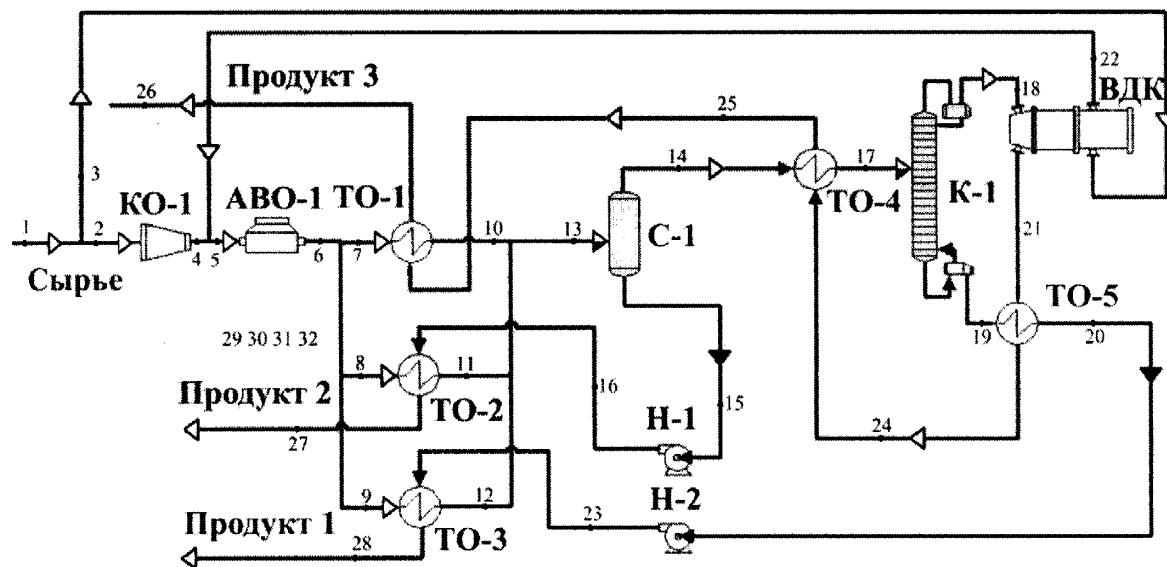


Рис. 4.9. Схема энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей с указанием контрольных сечений

В каждом сечении задаются или рассчитываются значения температуры, давления, массового расхода потока, а также массовые доли компонентов многокомпонентной газовой смеси (H_2 , CO , N_2 , CH_4). В случае, когда при переходе от одного сечения к другому величина параметра не меняется, уравнение может быть заменено равенством.

При создании математической модели энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей в предыдущих исследованиях разработаны математические модели отдельных ее функциональных элементов [231, 313, 314] и приняты следующие допущения:

– все процессы, происходящие в функциональных элементах установки, стационарные, равновесные, адиабатные;

– гидравлические потери в трубопроводах, сепараторе, ректификационной колонне и теплообменных агрегатах принимаются равными нулю ввиду их малости по сравнению с изменением давления в компрессорах, насосах и детандере;

– рабочий процесс сепаратора предполагает полное разделение двухфазного потока, исходя из условий фазового равновесия многокомпонентной среды;

– внешние теплопритоки к функциональным элементам системы низкотемпературного разделения, отсутствуют.

Система уравнений, описывающих стационарный режим работы энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей, выглядит следующим образом:

$$G_1 = G_2 + G_3; P_1 = P_2 = P_3; T_1 = T_2 = T_3. \quad (4.155)$$

Величина расхода G_3 газовой смеси, сжимаемой в компрессорной части волнового детандера-компрессора ВДК, определяется мощностью $N_{ВДК}$,

получаемой в детандерной части ВДК и рассчитывается с помощью соотношений из [231]:

$$G_3 = f_1(P_3, T_2, P_{22}, N_{ВДК}). \quad (4.156)$$

Давление P_4 на выходе из компрессора КО-1 и давление P_{22} на выходе из компрессорной части ВДК определяется по значению давления P_{16} на входе в ректификационную колонне К-1, исходя из отсутствия гидравлических потерь:

$$\begin{aligned} P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = \\ = P_{11} = P_{12} = P_{13} = P_{14} = P_{15} = P_{16} \end{aligned} \quad (4.157)$$

Температура T_{22} на выходе компрессорной части ВДК также определяется с помощью соотношений, приведенных в [313]:

$$T_{22} = f_3(P_3, T_3, P_{22}, G_3); \quad G_3 = G_{22}. \quad (4.158)$$

Аналогично определяется температура T_4 на выходе из компрессора КО-1 [313]:

$$T_4 = f_1(P_2, T_2, P_4, G_2); \quad G_2 = G_4. \quad (4.159)$$

На входе в аппарат воздушного охлаждения АВО-1 производится смешивание двух газовых потоков

$$G_5 = G_{22} + G_4. \quad (4.160)$$

При условии равенства давлений смешиваемых потоков величина давления остается постоянной, тогда как температура смеси T_6 определяется из условия закона сохранения энергии:

$$G_5 \cdot i(P_5, T_5) = G_4 \cdot i(P_4, T_4) + G_{22} \cdot i(P_{22}, T_{22}). \quad (4.161)$$

Давление P_6 на выходе из аппарата воздушного охлаждения АВО-1 известно из (4), тогда как температура T_6 определяется как:

$$T_6 = T_5 + \Delta T; \quad G_5 = G_6. \quad (4.162)$$

Величины расходов прямых потоков газовых смесей G_7 , G_8 и G_9 определяются следующей системой из условия обеспечения заданной величины разности температур в пинч-точке в теплообменниках ТО1, ТО2 и ТО3 по известным входным параметрам [231]:

$$\begin{aligned} G_8 &= f_4(P_8, T_8, P_{16}, T_{16}, G_{16}, \Delta T); \\ G_9 &= f_4(P_9, T_9, P_{23}, T_{23}, G_{23}, \Delta T). \\ G_6 &= G_7 + G_8 + G_9. \end{aligned} \quad (4.163)$$

Одновременно рассчитываются температуры прямых потоков T_{10} , T_{11} и T_{12} [231]:

$$\begin{aligned} T_{10} &= f_5(P_7, T_7, G_7, P_{25}, T_{25}, G_{25}, \Delta T); \\ T_{11} &= f_5(P_8, T_8, G_8, P_{16}, T_{16}, G_{16}, \Delta T); \\ T_{12} &= f_5(P_9, T_9, G_9, P_{23}, T_{23}, G_{23}, \Delta T); \\ G_7 &= G_{10}; \quad G_8 = G_{11}; \quad G_9 = G_{12}. \end{aligned} \quad (4.164)$$

и температуры продуктов 1, 2 и 3:

$$\begin{aligned} T_{26} &= f_5(P_7, T_7, G_7, P_{25}, T_{25}, G_{25}, \Delta T); \\ T_{27} &= f_5(P_8, T_8, G_8, P_{16}, T_{16}, G_{16}, \Delta T); \\ T_{28} &= f_5(P_9, T_9, G_9, P_{23}, T_{23}, G_{23}, \Delta T); \\ G_1 &= G_{26} + G_{27} + G_{28}. \end{aligned} \quad (4.165)$$

Массовые расходы продуктов 1, 2 и 3 описываются равенствами:

$$\begin{aligned}
 G_{18} &= G_{21} = G_{24} = G_{25} = G_{26}; \\
 G_{19} &= G_{20} = G_{23} = G_{28}; \\
 G_{15} &= G_{16} = G_{27}.
 \end{aligned}
 \tag{4.166}$$

Перед входом в сепаратор С-1 производится смешивание трех потоков газовых смесей одинакового состава

$$G_{13} = G_{10} + G_{11} + G_{12}. \tag{4.167}$$

При условии равенства давлений смешиваемых потоков величина давления остается постоянной, тогда как температура смеси T_{13} определяется из условия закона сохранения энергии:

$$\begin{aligned}
 G_{13} \cdot i(P_{13}, T_{13}) &= G_{10} \cdot i(P_{10}, T_{10}) + \\
 &+ G_{11} \cdot i(P_{11}, T_{11}) + G_{12} \cdot i(P_{12}, T_{12}).
 \end{aligned}
 \tag{4.168}$$

При расчете процесса разделения в сепараторе С-1 состав и массовый расход получаемых жидкой и паровой фаз определяется из условия фазового равновесия двухфазных многокомпонентных потоков. В данном случае используется алгоритм расчета сепаратора, изложенный в [313]. Комплект подпрограмм расчетов коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, базирующийся на уравнении состояния Пенга-Робинсона, позволяет рассчитать массовые состав жидкой и паровой фаз доли.

$$\begin{aligned}
 g_{CO_14}, g_{H_2_14}, g_{CH_4_14}, g_{N_2_14} = \\
 = f_6(P_{13}, T_{13}, g_{CO_13}, g_{H_2_13}, g_{CH_4_13}, g_{N_2_13});
 \end{aligned}
 \tag{4.169}$$

$$\begin{aligned}
 g_{CO_15}, g_{H_2_15}, g_{CH_4_15}, g_{N_2_15} = \\
 = f_6(P_{13}, T_{13}, g_{CO_13}, g_{H_2_13}, g_{CH_4_13}, g_{N_2_13});
 \end{aligned}
 \tag{4.170}$$

$$G_{13} = G_{14} + G_{15}; \quad T_{13} = T_{14} = T_{15}. \tag{4.171}$$

Расчет теплообменника ТО-4 выполняется по соотношениям, приведенным в [231]:

$$\begin{aligned} T_{17} &= f_5(P_{14}, T_{14}, G_{14}, P_{24}, T_{24}, G_{24}, \Delta T); \\ T_{25} &= f_5(P_{14}, T_{14}, G_{14}, P_{24}, T_{24}, G_{24}, \Delta T); \\ G_{14} &= G_{17}. \end{aligned} \quad (4.172);$$

Для обратного потока (продукта 3) может быть записано равенство

$$P_{21} = P_{24} = P_{25} = P_{26}. \quad (4.173)$$

Расчет процесса разделения газовой смеси в ректификационной колонне низкотемпературного разделения с ребойлером и реконденсатором К-1 производится по методике, описанной в [314], при этом:

$$\begin{aligned} g_{CO_18}, g_{H_2_18}, g_{CH_4_18}, g_{N_2_18} &= \\ &= f_7(P_{17}, T_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{18}, T_{18}); \\ g_{CO_19}, g_{H_2_19}, g_{CH_4_19}, g_{N_2_19} &= \\ &= f_8(P_{17}, T_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{19}, T_{19}); \\ T_{18} &= f_9(P_{18}, g_{CO_18}, g_{H_2_18}, g_{CH_4_18}, g_{N_2_18}); \\ T_{19} &= f_{10}(P_{19}, g_{CO_19}, g_{H_2_19}, g_{CH_4_19}, g_{N_2_19}); \\ G_{18} &= f_{11}(P_{17}, T_{17}, G_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{18}, T_{18}); \\ G_{19} &= f_{12}(P_{17}, T_{17}, G_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{19}, T_{19}); \\ P_{17} &= P_{19}; P_{18} = P_{19} - \Delta P_{PK}; G_{17} = G_{18} + G_{19}. \end{aligned} \quad (4.174)$$

Многокомпонентный газовый поток из реконденсатора ректификационной колонны К-1 направляется в детандерную часть волнового детандера-компрессора ВДК. Процесс расширения в детандере рассчитывается по методике, представленной в [231]:

$$T_{21} = f_{13}(P_{18}, T_{18}, P_{21}); N_{ВДК} = f_{14}(P_{18}, T_{18}, G_{18}, P_{21}). \quad (4.174)$$

Полезная мощность $N_{ВДК}$, получаемая в детандерной части ВДК, используется для сжатия газовой смеси в компрессорной части ВДК ((4) и (6)).

Утилизация части хладоресурса, полученного в детандерной части ВДК, используется для захлаживания жидкого продукта 1, выходящего из ребойлера ректификационной колонны. Расчет параметров теплообменника ТО-5 выполняется по методике [231]:

$$\begin{aligned} T_{20} &= f_5(P_{19}, T_{19}, G_{19}, P_{21}, T_{21}, G_{21}, \Delta T); \\ T_{24} &= f_5(P_{19}, T_{19}, G_{19}, P_{21}, T_{21}, G_{21}, \Delta T). \end{aligned} \quad (4.175)$$

Давление подачи продуктов 1 и 2 обеспечивается с помощью насосов Н-1 и Н-2, расчет которых производится по методике, представленной в [231]:

$$T_{16} = f_{15}(P_{15}, T_{15}, P_{16}, G_{15}); T_{23} = f_{15}(P_{20}, T_{20}, P_{23}, G_{20}). \quad (4.176)$$

Для замыкания системы уравнений (4.155) – (4.207) необходимо задать следующие рабочие параметры:

- давление P_1 , температура T_1 , расход G_1 и массовый состав компонентов газовой смеси на входе в установку разделения;
- температура окружающей среды $T_{о.с.}$;
- давление выдачи продуктов 1, 2 и 3 P_{26} , P_{27} и P_{28} ;
- давление в ректификационной колонне низкотемпературного разделения газовой смеси P_{17} и перепад давления по высоте

ректификационной колонны $P_{19} - P_{18}$, а также массовая доля CH_4 в потоке паровой фазы, отводимой из реконденсатора ректификационной колонны;

- величина недорекуперации теплоты ΔT в теплообменных аппаратах.

Далее требуется провести численное моделирование.

4.5. Выводы по разделу

1. Разработана модель технологического процесса экологически безопасной утилизации твердых углеродсодержащих отходов, реализация которой исключает возможность образования высокомолекулярных токсичных выбросов, что связано с газификацией отходов при температуре около $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и резким охлаждением полученного генераторного газа.

2. Разработана математическая модель трехмерного течения газодисперсной среды с фазовым превращением (испарением) и межфазным взаимодействием, которая качественно верно описывает основные особенности процесса охлаждения генераторного газа впрыском в него диспергированной жидкости.

3. При исследовании траекторий капель охлаждающей жидкости, представленная математическая модель позволяет отслеживать изменение импульса, массы и теплоты совокупности капель, а также температуру парогазовой смеси в различные моменты времени пребывания газа в теплообменнике.

4. Обосновано применение низкотемпературного разделения полученных при газификации отходов многокомпонентных углеводородных смесей, позволяет не только использовать полученный энергоноситель для поддержания процесса газификации, но и учитывает суточную и сезонную неравномерность потребления энергии и позволяет получать энергоноситель с содержанием метана, пригодный для хранения.

5. Разработана схема энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных углеводородных смесей, образующихся в процессе

газификации отходов, которая является исполнительным технологическим звеном системы управления экологической безопасностью при утилизации отходов.

6. Используя классический подход и общепринятые соотношения термодинамики, в том числе уравнение состояния Пенга-Робинсона для описания коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, разработаны математические модели функциональных элементов установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей, полученных при утилизации отходов. Данные модели представляют собой системы уравнений, которые позволяют определить температуры теплоносителя и охлаждающего воздуха на выходе из теплообменника при заданном соотношении массовых расходов теплоносителя и воздуха, а так же компонентный состав конечных продуктов.

7. Математическое описание функциональных элементов, применяемых в энерготехнологической установке, при установлении связи между ними по принципу «выход из элемента А – вход в элемент Б» позволило создать систему замыкающих уравнений.

РАЗДЕЛ 5

**УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ УТИЛИЗАЦИЮ
ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ
ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ**

Технологический процесс экологически безопасной утилизации твердых углеродсодержащих отходов предполагает применение процессов смешанной газификации (рис. 5.1).

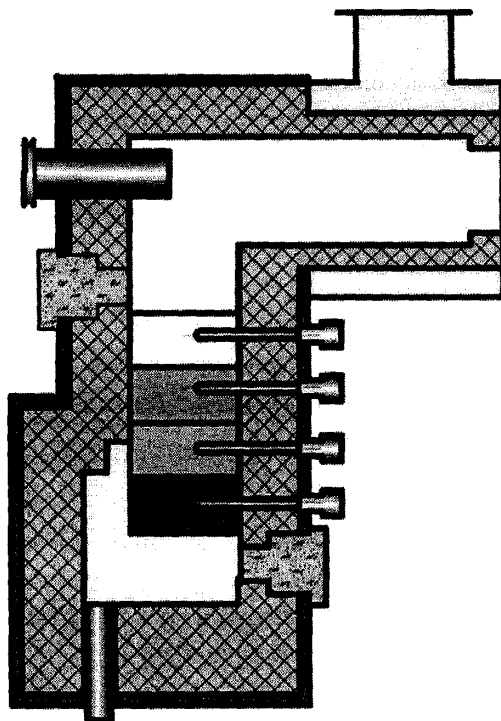


Рис. 5.1. Схема устройства для смешанной газификации твердых углеродсодержащих отходов

В соответствии с данной схемой нижний слой – это слой горения, где происходит реакция окисления, далее следует слой восстановления с недостатком кислорода, слой пиролиза и последний слой – слой сушки. По мере прохождения процесса сырье движется сверху вниз, а образующийся генераторный газ отводится вверх и далее – на дожигание струей плазмы.

Таким образом, процессы смешанной газификации будут происходить в следующей последовательности. Твердые отходы загружаются в вертикальную шахту печи через узел загрузки, и попадают в камеру сжигания, где, двигаясь, вниз подогреваются, и подвергаются газификации. В нижний слой подается окислитель. Продукты газификации проходят через узкую область горловины вертикальной шахты, где при высокой температуре происходит крекинг смол, что способствует уменьшению их количества. Образовавшиеся газы, поднимаются вверх и из верхней части вертикальной шахты поступают в газоотводной канал. Твердые продукты газификации: шлаки и металлы, под действием собственного веса попадают в камеру гомогенизации, где они обрабатываются струей плазмы при температуре 1100...1300 °С, а далее выгружаются через узлы выгрузки. Полученный газ попадает в газовую камеру и объединяется в ней с газом, который подается к ней из камеры сжигания. Объединенный поток газа поступает в камеру дожигания, где также обрабатывается струей плазмы при температуре 1100...1300 °С. В результате обработки образуется синтез-газ и твердое вещество, которые не содержат диоксинов.

5.1. Разработка конструкции печи для смешанной газификации твердых углеродсодержащих отходов

При разработке конструкции печи для смешанной газификации твердых углеродсодержащих отходов учитывались экстремальные условия, которые создаются в ней при использовании плазмотронов в качестве

источников тепла. Нагрев материала осуществляется с помощью электродуговых плазмотронов, работающих как на инертных, так и кислород-содержащих газах. В центре камеры образуется зона с экстремально высокими температурами – в плазменной струе, а возле стенок камеры - зоны с более низкими температурами. Для эффективной обработки материала необходимо создать температуру в зоне нахождения сырья 1100...1300 °С. Обеспечение такого режима должно быть обусловлено условиями теплоотвода через стенки камеры и соответствующим выбором материала и толщины слоя футеровки.

5.1.1. Тепловой расчет футеровки и теплоизоляции печи

Теплота, получаемая в камере сгорания печи, идет на покрытие тепловых потерь в окружающую среду через стенки вследствие теплопроводности и на аккумуляцию ее в тепловом ограждении печи. Согласно имеющимся литературным данным эти потери теплоты составляют от 14 до 41 % всех потерь в печи [8]. Расчет проводился из условия предельно допустимой температуры на стенках камеры и элементах корпуса - 1350°С.

5.1.1.1. Расчет потерь теплоты через тепловое ограждение камеры сгорания.

Учитывая стационарный характер процесса теплообмена стенок печи с окружающей средой согласно теории теплопроводности количество тепла, отводимое в окружающую среду равно:

$$Q_{oc} = \alpha_{oc} (t_{нар} - t_{oc}), \quad (5.1)$$

где $t_{\text{нар}}$ – наружная температура стенки, $t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды, $\alpha_{\text{ос}}$ – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки в окружающую среду, Вт/(м²·К). Коэффициенты определяются согласно данным работы [8]:

– для вертикальной стенки:

$$\alpha_{\text{ос}} = 9,5 + 98,2 \cdot 10^{-3}(t_{\text{нар}} - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4}(t_{\text{нар}} - 30)^2 + 1,74 \cdot 10^{-6}(t_{\text{нар}} - 30)^3, \quad (5.2)$$

– для верха горизонтальной стенки

$$\alpha_{\text{ос}} = 9,7 + 0,1(t_{\text{нар}} - 30) - 4,43 \cdot 10^{-4}(t_{\text{нар}} - 30)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6}(t_{\text{нар}} - 30)^3, \quad (5.3)$$

– для низа горизонтальной стенки

$$\alpha_{\text{ос}} = 9,5 + 91,5 \cdot 10^{-3}(t_{\text{нар}} - 30) - 3,88 \cdot 10^{-4}(t_{\text{нар}} - 30)^2 + 1,37 \cdot 10^{-6}(t_{\text{нар}} - 30)^3, \quad (5.4)$$

Область действия формул $t_{\text{нар}} = 25 \dots 210$ °С. Толщина температурных швов в футеровке, м,

$$\delta_{\text{ш}} = t_{\text{ср}\ell} \cdot \alpha, \quad (5.5)$$

где ℓ – расстояние между температурными швами в футеровке, м; α – истинный коэффициент линейного расширения огнеупора, °С⁻¹;

$$t_{\text{ср}\ell} = 0,5(t_{\text{ш}} + t_1), \quad (5.6)$$

Рекомендуемая толщина температурных швов для кладки в зависимости от материала изделия, мм: шамотный, каолиновый, высокоглиноземистый 5...6 мм; диасовый 12 мм; хромомagneзитовый 10...12 мм; магнезитовый 12...14 мм; безобжиговый тальковый 8...10 мм; из диасового легковеса 10; диатомового, из шамотного легковеса 5...6 мм.

Конструктивные размеры камеры сгорания, шахты и камеры дожигания привязаны к стандартным размерам кирпича. Для определения потерь тепла через стенки проведен поверочный расчет.

При поверочном расчете устанавливается плотность теплового потока через теплое ограждение $q_{ос}$, Вт/м², и распределение температуры по толщине теплового ограждения. На рис. 5.2 приведена расчетная схема процесса теплопередачи через стенку.

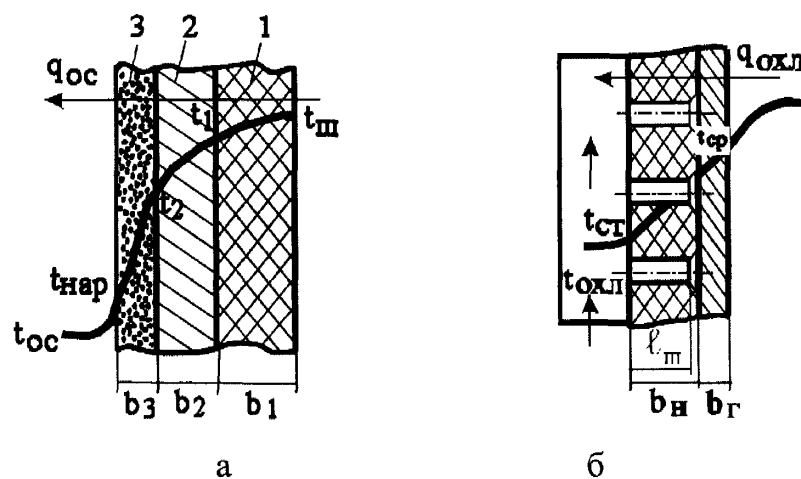


Рис. 5.2. Распределение температуры при стационарном тепловом состоянии по толщине теплового ограждения: 1 – рабочий огнеупор; 2 – легковес; 3 – тепловая изоляция

Для проведения расчета принимаем:

- толщина слоев b_1 , b_2 , b_3 ;
- положение теплового ограждения в пространстве, материал слоев и коэффициент теплопроводности λ ;
- предельно допустимые рабочие температуры материалов t_{\max} .

При расчете задается ряд значений $t_{\text{нар}}$ от 50 до 400 °С и вычисляется по формуле

$$q_{\text{ос}}^{\text{нар}} = f_1(t_{\text{нар}}) = \alpha_{\text{ос}}^j (t_{\text{нар}} - t_{\text{ос}}); \quad (5.7)$$

Далее задаются грубые приближенные значения t'_1 , t'_2 , $t'_{\text{нар}}$ и определяются в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} t'_{\text{ср1}} &= 0,5(t_{\text{ос}} + t'_1), \\ t'_{\text{ср2}} &= 0,5(t'_1 + t'_2), \\ t'_{\text{ср3}} &= 0,5(t'_2 + t'_{\text{нар}}), \end{aligned} \quad (5.8)$$

а так же

$$\lambda'_i = f_1(t'_{\text{ср}i}), \quad \sum_i R'_i = \frac{b_1}{\lambda'_1} + \frac{b_2}{\lambda'_2} + \frac{b_3}{\lambda'_3}, \quad (5.9)$$

где R – тепловое сопротивление слоя.

Далее рассчитывают удельный тепловой поток через все слои футеровки:

$$q_{\text{ос}}^{\text{обм}} = \frac{(t_{\text{обм}} - t_{\text{нар}})}{\sum_{i=1} R'_i}, \quad (5.10)$$

и строят графики

$$q_{\text{ос}}^{\text{нар}} = f_1(t_{\text{нар}}), \quad q_{\text{ос}}^{\text{обм}} = f_2(t_{\text{нар}}) \quad (5.11)$$

в точке пересечения которых находится истинное значение $q_{\text{ос}}$, $t_{\text{нар}}$.

Уточняем температуры в соответствии с приведенными ниже выражениями

$$t_1 = t_{\text{вн}} - q_{\text{ос}} R_1', \quad t_2 = t_{\text{вн}} - q_{\text{ос}} (R_1' + R_2'), \quad (5.12)$$

$$t_{\text{ср1}} = 0,5(t_{\text{ом}} + t_1), \quad t_{\text{ср2}} = 0,5(t_1 + t_2), \quad t_{\text{ср3}} = 0,5(t_2 + t_{\text{нар}}), \quad (5.13)$$

$$\lambda_i = f(t_{\text{ср}i}), \quad R_i = \frac{b_i}{\lambda_i}. \quad (5.14)$$

Если относительное расхождение

$$\frac{|R_1 - R_1'|}{R_1}, \quad \frac{|R_2 - R_2'|}{R_2}, \quad \frac{|R_3 - R_3'|}{R_3}, \quad (5.15)$$

больше допустимого, например $\varepsilon = 0,02$, то расчет повторяем, задаваясь уточненными значениями $t_1, t_2, t_i, t_{\text{нар}}$ пока относительное расхождение станет меньше допустимого.

Обеспечение условий требуемых условий определяем по формуле

$$t_1 < t_{\text{раб2}}^{\text{макс}} \quad \text{и} \quad t_2 < t_{\text{раб3}}^{\text{макс}}. \quad (5.16)$$

Если они не выполняются, то тепловое ограждение неработоспособно в данных условиях и его параметры необходимо изменить.

5.1.1.2. Тепловой расчет стенки печи

При тепловом расчете стенки печи исходим из следующего. Стенка печи состоит из слоя шамотного кирпича ША-5, шамотного легковеса ШЛ-0,4 и слоя картона асбестового;

Толщины стенок: $b_1 = 0,065$ м; $b_2 = 0,065$ м; $b_3 = 0,02$ м. Температура стенки внутри печи $t_1 = 1200$ °С, температура стенки со стороны окружающей среды $t_{\text{ос}} = 25$ °С.

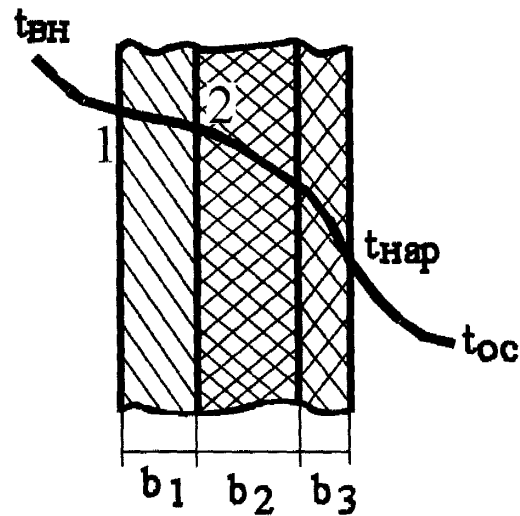


Рис. 5.3. Расчетная схема стенки печи

Поверочный расчет. Начальное распределение температуры по слоям футеровки:

$$t_2 = 1000^{\circ}\text{C}; \quad t_3 = 500^{\circ}\text{C}.$$

Средние температуры слоев:

$$t_{\text{ср1}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = 1100^{\circ}\text{C}; \quad (5.17)$$

$$t_{\text{ср2}} = \frac{t_2 + t_3}{2} = 750^{\circ}\text{C}; \quad (5.18)$$

$$t_{\text{ср3}} = \frac{t_3 + t_{\text{нар}}}{2} = 260^{\circ}\text{C}. \quad (5.19)$$

Коэффициенты теплопроводности [175]:

- для шамотного кирпича ША-5 $\lambda_1 = 0,84 + 58 \cdot 10^{-5}t = 1,48 \text{ Вт/м}^2\text{с};$
- для шамотного легковеса ШЛ-04 $\lambda_2 = 0,058 + 17 \cdot 10^{-5}t = 0,1855 \text{ Вт/м}^2\text{с};$
- для картона асбестового $\lambda_3 = 0,19 \text{ Вт/м}^2\text{с}.$

Тепловое сопротивление каждого слоя:

$$R_1 = \frac{b_1}{\lambda_1} = 0,044 \text{ м}^2\text{с/Вт}; R_2 = \frac{b_2}{\lambda_2} = 0,35 \text{ м}^2\text{с/Вт}; R_3 = \frac{b_3}{\lambda_3} = 0,1 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.20)$$

Общее тепловое сопротивление всех слоев:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 = 0,5 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.21)$$

Удельный тепловой поток через все слои футеровки:

$$q_{oc} = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{R_{\Sigma}} = 2750 \text{ Вт/м}^2. \quad (5.22)$$

Температура в точке 2 (рис. 5.3)

$$t_2 = t_1 - q_{oc} R_1 = 1079^{\circ}\text{C}. \quad (5.23)$$

Поскольку полученное значение температуры в точке 2 не совпадает с ранее принятым, то производится пересчет при новом значении $t_2 = 1079^{\circ}\text{C}$.

Окончательные значения температур в промежуточных точках футеровки:

$$t_2 = 1078^{\circ}\text{C},$$

$$t_3 = t_2 - q_{oc} R_2 = 110^{\circ}\text{C}.$$

Предельная рабочая температура шамотного легковеса составляет 1150°C , а картона асбестового – 550°C . Полученные температуры слоев ниже этого уровня, поэтому делается вывод о работоспособности данного теплового ограждения.

5.1.1.3. Тепловой расчет стенки шахты

На рис. 5.8 приведена расчетная схема теплового ограждения шахты.

При проведении теплового расчета стенки шахты считаем, что стенка состоит из слоя шамотного легковеса ШЛ-0,4 и слоя картона асбестового. Толщины стенок равна $b_1 = 0,115 \text{ м}$; $b_2 = 0,015 \text{ м}$. Температура стенки внутри

печи $t_1 = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, температура стенки со стороны окружающей среды $t_{oc} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Начальное значение температуры между слоями футеровки: $t_2 = 240 \text{ }^\circ\text{C}$.

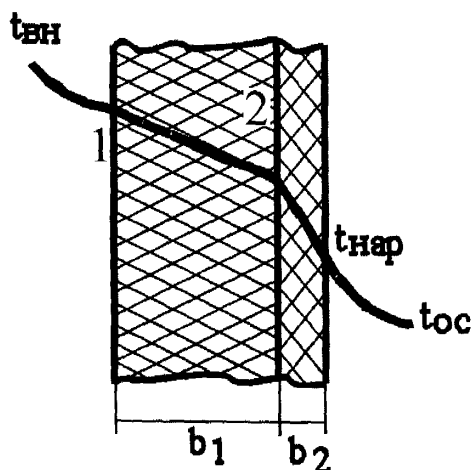


Рис. 5.4. Расчетная схема теплового ограждения шахты

Средняя температура слоя легковеса:

$$t_{cpl} = \frac{t_1 + t_2}{2} = 720 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (5.23)$$

Коэффициенты теплопроводности [175]:

- для шамотного легковеса ШЛ-04 $\lambda_1 = 0,058 + 17 \cdot 10^{-5} t = 0,18 \text{ Вт/м}^2\text{с}$;
- для картона асбестового $\lambda_3 = 0,19 \text{ Вт/м}^2\text{с}$.

Тепловое сопротивление каждого слоя:

$$R_1 = \frac{b_1}{\lambda_1} = 0,64 \text{ м}^2\text{с/Вт}; \quad R_2 = \frac{b_2}{\lambda_2} = 0,08 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.24)$$

Общее тепловое сопротивление всех слоев:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 = 0,72 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.25)$$

Удельный тепловой поток через все слои футеровки:

$$q_{oc} = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{R_{\Sigma}} = 1632 \text{ Вт/м}^2. \quad (5.26)$$

Температура в точке 2 (рис. 5.4)

$$t_2 = t_1 - q_{oc} R_1 = 155,6^\circ\text{C}. \quad (5.27)$$

Полученное значение температуры в точке 2 не совпадает с ранее принятым, поэтому производится пересчет при новом значении $t_2 = 155^\circ\text{C}$.

После двух циклов пересчета определено окончательные значение температуры в промежуточной точке футеровки:

$$t_2 = 150^\circ\text{C}.$$

Предельная рабочая температура картона асбестового составляет 600°C . Полученная температура ниже этого уровня, поэтому делается вывод о работоспособности данного теплового ограждения.

5.1.1.3. Тепловой расчет пода

На рис. 5.5 приведена расчетная схема футеровки пода.

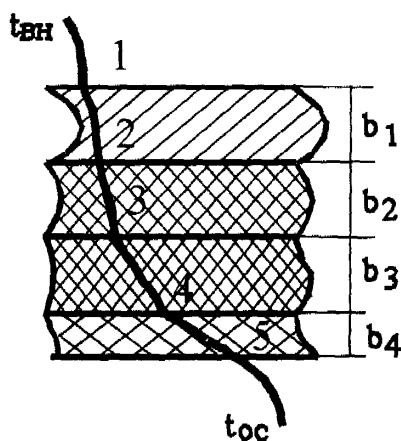


Рис. 5.5. Расчетная схема футеровки пода

Футеровка пода печи состоит из слоя шамотного кирпича ША-5, двух слоев шамотного легковеса ШЛ-1,0 и слоя картона асбестового. Толщины отдельных слоев футеровки: $b_1 = 0,065$ м; $b_2 = 0,065$ м; $b_3 = 0,065$ м; $b_4 = 0,02$ м. Температура внутреннего слоя футеровки печи $t_1 = 1350$ °С, а температура стенки со стороны окружающей среды $t_{oc} = 25$ °С.

Поверочный расчет проводим следующим образом.

Начальное распределение температуры по слоям футеровки в соответствии с рис. 5.5:

$$t_2 = 1230 \text{ °С}; t_3 = 500 \text{ °С}; t_4 = 200 \text{ °С}.$$

Средние температуры слоев:

$$t_{cp1} = \frac{t_1 + t_2}{2} = 1290 \text{ °С}; t_{cp2} = \frac{t_2 + t_3}{2} = 865 \text{ °С}; t_{cp3} = \frac{t_3 + t_{нар}}{2} = 350 \text{ °С}.$$

Коэффициенты теплопроводности [175]:

- для шамотного кирпича ША-5 $\lambda_1 = 0,84 + 58 \cdot 10^{-5}t = 1,59 \text{ Вт/м}^2\text{с};$
- для шамотного легковеса ШЛ-1,0 слоя 2 $\lambda_2 = 0,31 + 35 \cdot 10^{-5}t = 0,61 \text{ Вт/м}^2\text{с};$
- для шамотного легковеса ШЛ-1,0 слоя 3 $\lambda_3 = 0,31 + 35 \cdot 10^{-5}t = 0,43 \text{ Вт/м}^2\text{с};$
- для слоя картона асбестового $\lambda_4 = 0,19 \text{ Вт/м}^2\text{с}.$

Тепловое сопротивление каждого слоя:

$$R_1 = \frac{b_1}{\lambda_1} = 0,041 \text{ м}^2\text{с/Вт}; R_2 = \frac{b_2}{\lambda_2} = 0,106 \text{ м}^2\text{с/Вт};$$

$$R_3 = \frac{b_3}{\lambda_3} = 0,15 \text{ м}^2\text{с/Вт}. R_4 = \frac{b_4}{\lambda_4} = 0,105 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.28)$$

Общее тепловое сопротивление всех слоев:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 = 0,4 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.29)$$

Удельный тепловой поток через все слои футеровки:

$$q_{\text{ос}} = \frac{t_1 - t_{\text{нар}}}{R_{\Sigma}} = 3294 \text{ Вт/м}^2. \quad (5.30)$$

Новое значение температур:

- в точке 2 $t_2 = t_1 - q_{\text{ос}} R_1 = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$;

- в точке 3 $t_3 = t_2 - q_{\text{ос}} R_1 = 866 \text{ }^\circ\text{C}$.

Принимаем в точке 2 $t_2 = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$, в точке 3 – $t_3 = 860 \text{ }^\circ\text{C}$

Средние температуры слоев:

$$t_{\text{ср1}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = 1282,5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{\text{ср2}} = \frac{t_2 + t_3}{2} = 1037,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ср3}} = \frac{t_3 + t_{\text{нар}}}{2} = 530 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Коэффициенты теплопроводности [175]:

- для шамотного кирпича ША-5 – $\lambda_1 = 0,84 + 58 \cdot 10^{-5} t = 1,58 \text{ Вт/м}^2\text{с}$;

- для шамотного легковеса ШЛ-1,0 слоя 2 – $\lambda_2 = 0,31 + 35 \cdot 10^{-5} t = 0,67 \text{ Вт/м}^2\text{с}$;

- для шамотного легковеса ШЛ-1,0 слоя 3 – $\lambda_3 = 0,31 + 35 \cdot 10^{-5} t = 0,496 \text{ Вт/м}^2\text{с}$;

- для слоя картона асбестового – $\lambda_3 = 0,19 \text{ Вт/м}^2\text{с}$.

Тепловое сопротивление каждого слоя:

$$R_1 = \frac{b_1}{\lambda_1} = 0,041 \text{ м}^2\text{с/Вт}; \quad R_2 = \frac{b_2}{\lambda_2} = 0,097 \text{ м}^2\text{с/Вт};$$

$$R_3 = \frac{b_3}{\lambda_3} = 0,131 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad R_4 = \frac{b_4}{\lambda_4} = 0,105 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.31)$$

Общее тепловое сопротивление всех слоев:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 = 0,374 \text{ м}^2\text{с/Вт}. \quad (5.32)$$

Удельный тепловой поток через все слои футеровки:

$$q_{\text{ос}} = \frac{t_1 - t_{\text{нар}}}{R_{\Sigma}} = 3543 \text{ Вт/м}^2. \quad (5.33)$$

Новое значение температур:

$$\text{– в точке 2 } t_2 = t_1 - q_{\text{ос}} R_1 = 1205 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\text{– в точке 3 } t_3 = t_2 - q_{\text{ос}} R_2 = 861 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\text{– в точке 4 } t_4 = t_3 - q_{\text{ос}} R_3 = 397 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Поскольку полученное значение температуры в точке 4 существенно отличается от ранее принятого значения, то производится пересчет при новом значении $t_4 = 390 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Окончательные значения температур в промежуточных точках футеровки:

$$t_2 = 1201 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_3 = 850 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_4 = 404 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким образом, в результате расчета определены геометрические параметры футеровки печи при требуемых температурах в печи и на ее стенках.

5.1.2. Конструкция плазменной печи

На рис. 5.6 приведена конструктивная схема плазменной печи с основными размерами. Она имеет три основных части: камеру сгорания в нижней части, шахту и камеру дожигания.

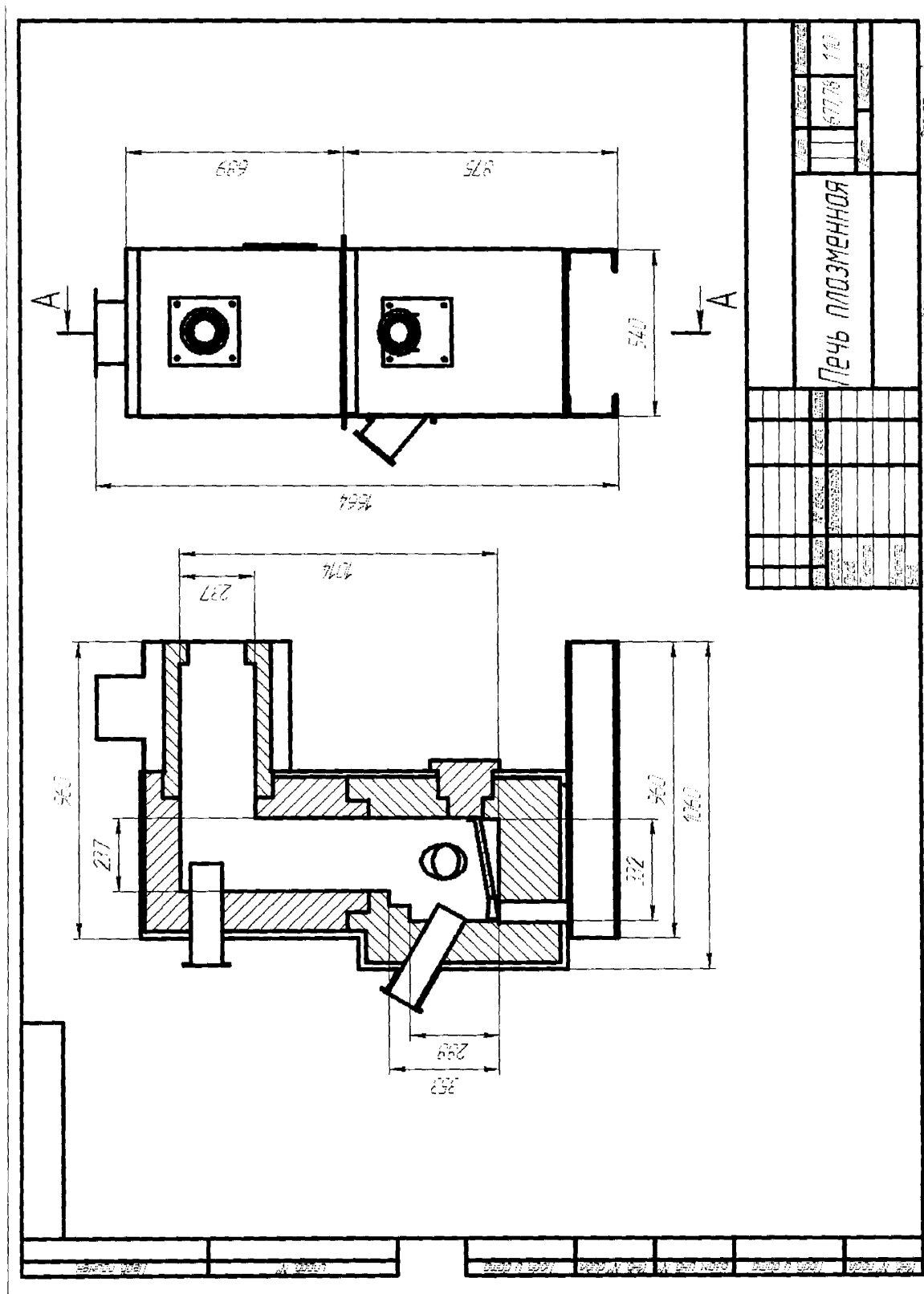


Рис. 5.6. Конструкция печи для смешанной газификации твердых углеродсодержащих отходов

Камера сгорания печи изготовлена с использованием шамотного кирпича типа ША5 на внутренней поверхности и легковеса ШЛ-0,4 – снаружи, уложенных в четверть кирпича. Наружная часть печи покрыта дополнительно тремя слоями картона асбестового толщиной 5 мм. Общая толщина слоя асбеста – 15 мм.

Шахта над камерой выполнена из легковеса ШЛ-0,4, уложенного в полкирпича. Отводящая труба изготовлена из легковеса и муллитокремнеземистой плиты типа МКРП-450, расположенных в два слоя, общей толщиной 80 мм.

Кладка футеровки размещена внутри металлической рамы, выполненной из стального уголка 50. Наружная поверхность печи покрыта листовой сталью толщиной 1 мм. Для охлаждения камеры дожигания выполнен коллектор с вводом воздуха из помещения и сбросом его в общую магистраль отвода газа.

Печь снабжена люком для технического обслуживания, расположенного сбоку камеры сгорания и люком для отвода расплава металла, расположенного снизу. Загрузка сырья производится через люк загрузки, расположенном в шахте (рис. 5.7).

В печи выполнены места для размещения 2-х плазмотронов в камере сгорания и одного в камере дожигания. Они размещаются в керамических трубах диаметром 106 мм и защищены от внешнего тепла с помощью теплоизоляции МКРВ-200. Отработка плазменных технологий утилизации изображена на рис. 5.8, 5.9.

Процесс термохимической газификации с последующим дожиганием газов реализован в изготовленной конструкции плазменной печи в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.1.

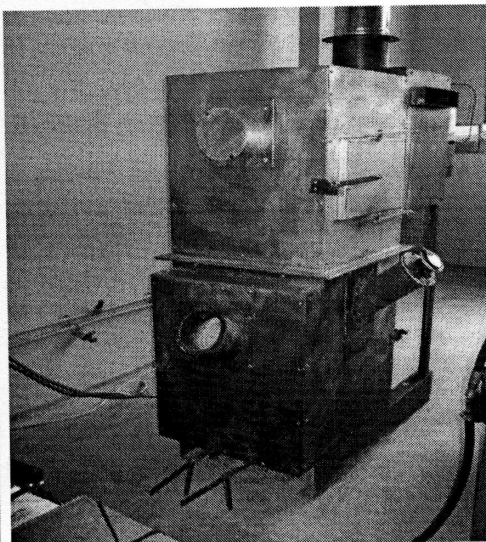
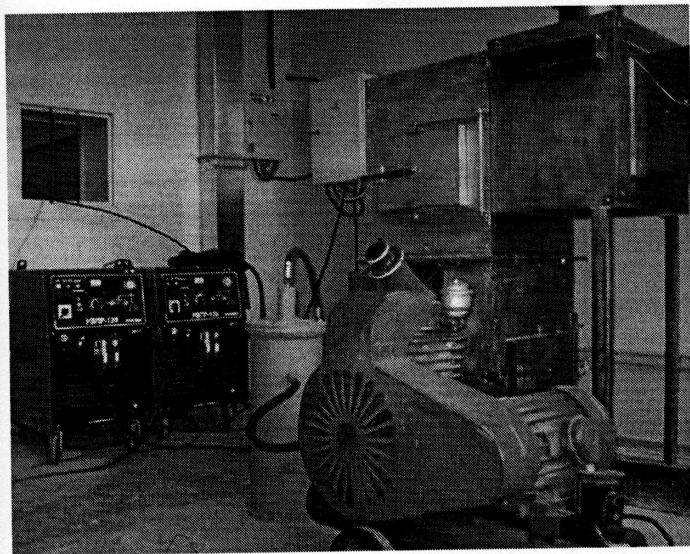
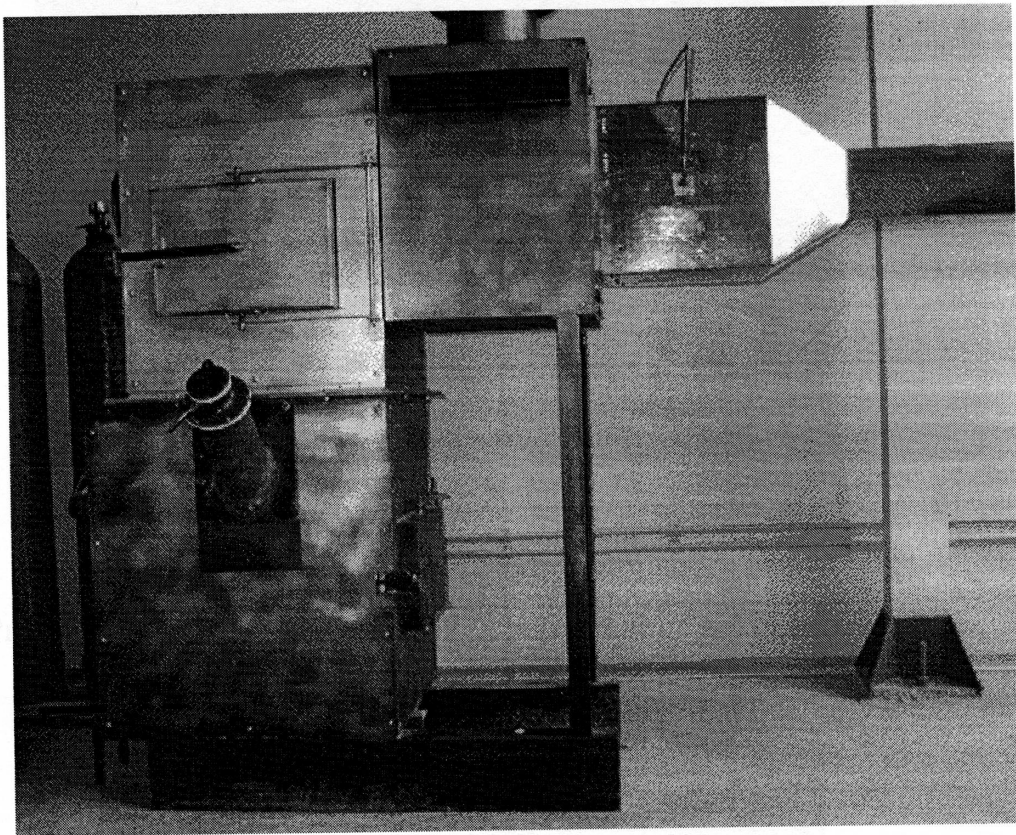


Рис. 5.7. Общий вид плазменной печи



Рис. 5.8. Нейтральный твердый остаток в виде остеклованного шлака

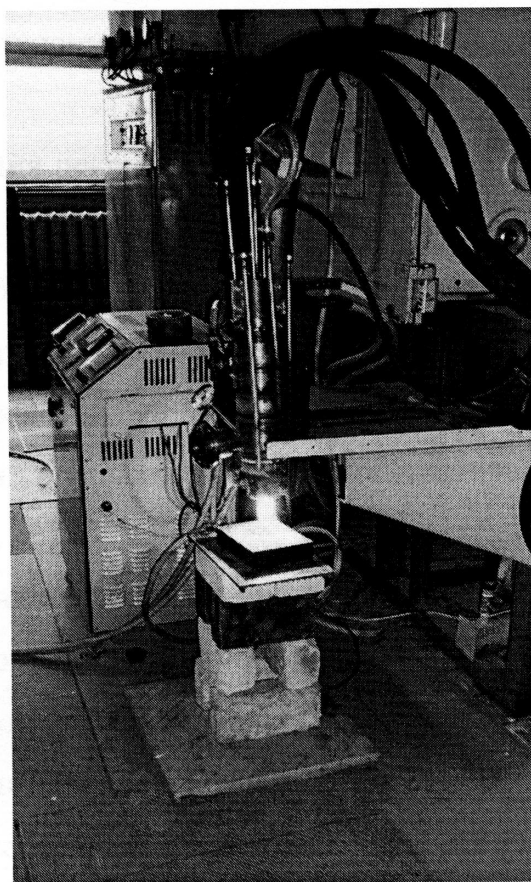


Рис. 5.9. Установка для отработки плазменной утилизации
углеродсодержащих отходов

Печь рассчитана на разовую загрузку 1,5 кг сырья в виде твердых отходов. Среднее время обработки после прогрева печи – 15...20 мин. Расход сырья составляет 600 кг/смену. Максимальное количество образующегося твердого остатка составляет 20 %, тогда при 8-часовой смене минимальный выход газа из установки газификации составит 60 кг/ч.

Для реализации процесса печь внутри оборудована шахтой, в которую загружается сырье. Снизу шахты располагается днище с отверстиями, через которые происходит отвод золы, образующейся при сгорании. Для обеспечения процесса горения в днище установлены фурмы для подачи воздуха снизу. В процессе газификации в шахте образуются слои, различающиеся процессами.

5.2. Разработка конструкции устройства для охлаждения генераторного газа, полученного при утилизации отходов

Для предотвращения рекомбинации молекул и образования диоксинов и фуранов в процессе охлаждения после обработки генераторного газа в камере дожигания необходимо обеспечить быстрое прохождение опасной области температур, при которой образуются диоксины и фураны. Они наиболее активно возникают в диапазоне температур от 400 до 850 °С.

После дожигания в плазменном газогенераторе температура газа составляет около 1100...1200 °С. Далее, согласно технологии газ должен подвергаться метанированию при температуре примерно 300 °С. Поэтому, для избежания синтезирования диоксинов, в установке предусмотрено резкое охлаждение генераторного газа, которое обеспечивается в теплообменнике с помощью впрыскивания диспергированной воды в поток горячего газа, выходящего из газогенератора. На рис. 5.10 показана общая схема теплообменника.

На входе в теплообменник установлены три форсунки для распыла воды: одна форсунка – с одной стороны и две форсунки – с другой. Форсунки размещены со смещением в плоскости, чтобы обеспечить полное перекрытие площади сечения канала.

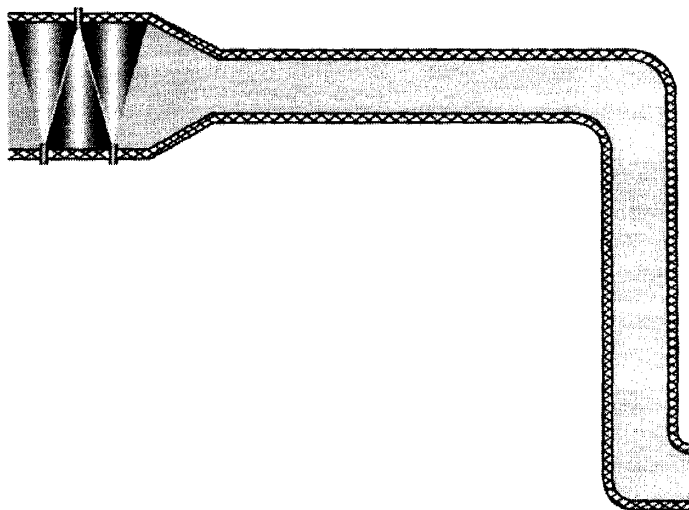


Рис. 5.10. Схема организации охлаждения горячего потока генераторного газа

Газ, проходящий через распыленную воду, нагревает ее и отводит тепло благодаря теплоте испарения.

Форсунка имеет угол факела распыла, равный 55° . Схема расположения форсунок и создаваемых ими факелов распыла показана на рис. 5.11. Общий вид форсунки в разрезе, ее конструктивная схема и размещение в стенке трубы показано на рис. 5.12. Расчет форсунки проведен по методике, принятой для жидкостных реактивных двигателей [61] и проверен по методикам [185]. В результате расчетов центробежной форсунки получен диаметр сопла форсунки, равный 0,6 мм.

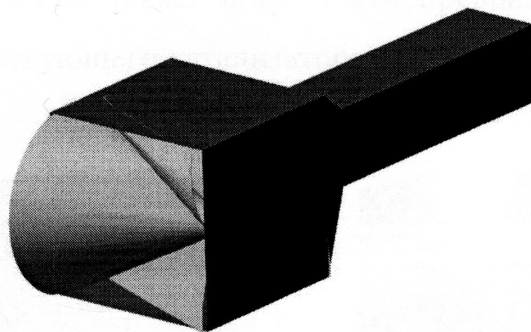


Рис. 5.11. Схема создания водяной завесы в теплообменнике для горячего потока генераторного газа

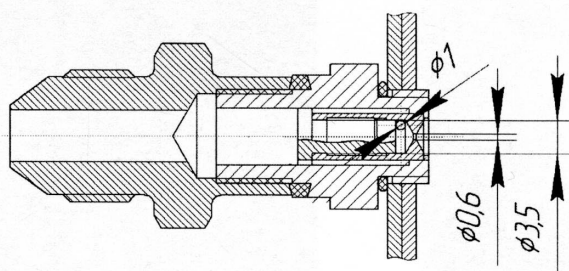


Рис. 5.12. Конструктивная схема выбранной форсунки

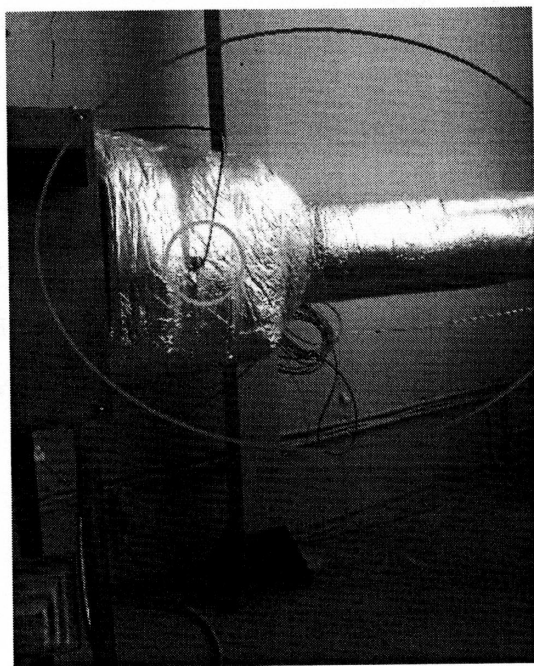
Расположение форсунок на теплообменнике показано на (рис. 5.13), где одна из них – расположена с одной стороны корпуса (рис. 5.13, а), а две другие – на противоположной плоскости (рис. 5.13, б).

Расчет системы охлаждения проведен из условия обеспечения снижения температуры генераторного газа от $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расход газа – 60 кг/ч .

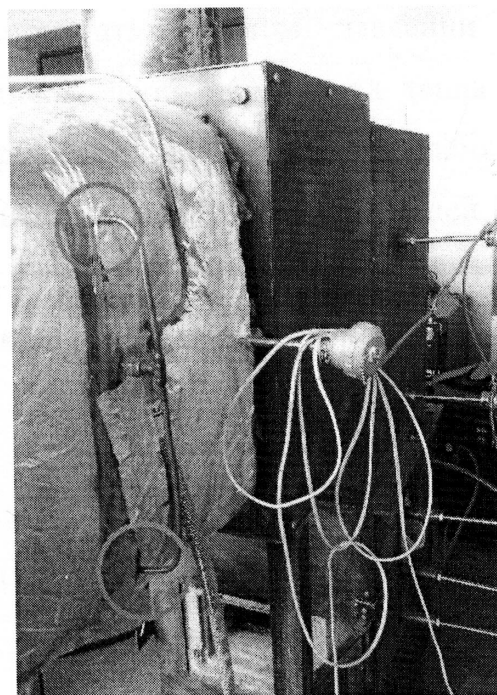
5.3. Конструкция реактора метанирования

Генераторный газ, полученный после газификации, обогащается метаном в процессе метанирования. Метанирование – каталитический процесс, который преобразует синтез-газ (в основном CO и H_2) в метан с в присутствии катализатора на никелевой основе. Другие компоненты, такие

как бензол, толуол, ксилол, также могут быть превращены в метан при использовании соответствующего катализатора.



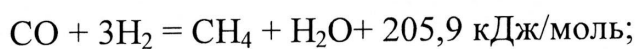
а

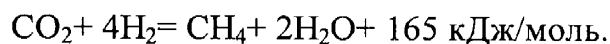


б

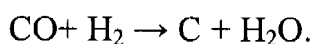
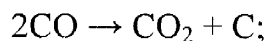
Рис. 5.13. Система оросительного охлаждения генераторного газа:
а – вид спереди; б – вид сзади; большая окружность – исследуемый участок теплообменника; малая окружность – место установки форсунок

Для увеличения колорийности газа на выходе из метанатора, процесс проводят с подачей водяного пара. В качестве катализатора может быть использован промышленный катализатор метанирования «НКМ-1». Он содержит 34...38 % NiO и не менее 48 % Al₂O₃. Реакция метанирования экзотермична, что позволяет получить дополнительное тепло. Содержание метана увеличивается за счет реакции окиси и двуокиси углерода с водородом:





Диапазон температур для наиболее эффективной реакции метанирования составляет 200...400 °С при атмосферном давлении. Поскольку реакция метанирования экзотермична, необходим отвод тепла либо с помощью теплообменника с циркулирующим теплоносителем, либо путем впрыска воды. Тепло можно отвести и использовать для других целей, например подогрева воды. Однако излишний отвод тепла может привести к образованию углерода (коксованию). Реакция коксования происходит следующим образом:



Образование углерода приводит к снижению эффективности реакции и активности катализатора вследствие его закоксовывания. Для подавления этих реакций вводится водяной пар. Содержание водяного пара в количестве 35,4 % в газе позволяет полностью подавить образование углерода. При этом может быть достигнут КПД 88 %.

Наибольшее образование углерода происходит при низких температурах, меньших 300 °С, и высоких давлениях. В то же время более высокая эффективность процесса метанирования наблюдается при более высоком давлении и температуре до 450 °С (Р = 40 бар). Однако применение высокого давления повышает энергетические затраты на осуществление процесса.

При давлении 1 бар эффективность процесса метанирования снижается при температуре выше 300 °С. Поэтому в установке используется давление, близкое к атмосферному, и поддерживается температура в реакторе на уровне 300 °С. В качестве катализатора может быть использован также

мартеповский шлак, КПД которого составляет 40 %, однако он более доступен [241].

Процесс метанирования по предлагаемой конструктивной схеме (рис. 5.14) можно описать следующим образом.

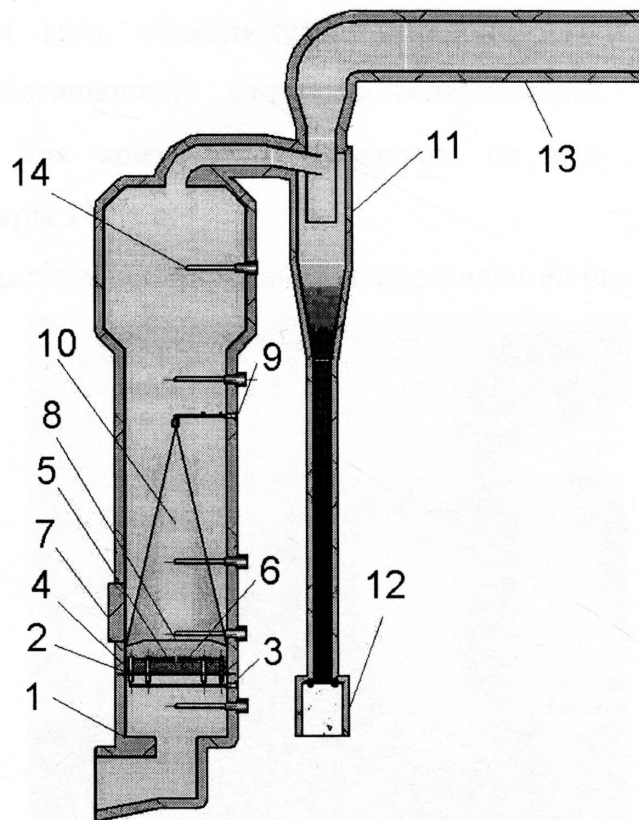


Рис. 5.14. Конструктивная схема реактора метанирования:

1 – корпус реактора; 2 – решетка; 3, 9, 13 – трубопроводы; 4 – фурмы для распыла воды; 5, 10 – факелы распыла; 6 – катализатор; 7 – загрузочный люк; 8 – псевдокипящий слой; 11 – циклон; 12 – отстойник; 14 – термопары

Подача генераторного газа в реактор осуществляется снизу. Реактор состоит из корпуса 1, в котором установлена решетка 2, где установлены фурмы 4 для распыла воды. Вода подается через трубопровод 3 и распыляется в виде факелов 5 в слое катализатора 6, размещенного на решетке 2 и загружаемого через люк 7. Решетка снабжена отверстиями, через которые проходит генераторный газ и создает над ней псевдокипящий слой

8. Подача воды через фурмы обеспечивает протекание реакции метанирования. Кроме того, при превышении уровня температур $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ через трубопровод 9 подается дополнительное количество воды, которая распыляется форсункой в виде факела 10. Твердые частицы катализатора, выносимые потоком газа, отделяются в циклоне 11 и собираются в отстойнике 12. Обогащенный метаном генераторный газ отводится трубопроводом 13. Для контроля температуры по ходу движения газа установлены термопары 14.

Общий вид реактора метанирования представлен на рис. 5.15.

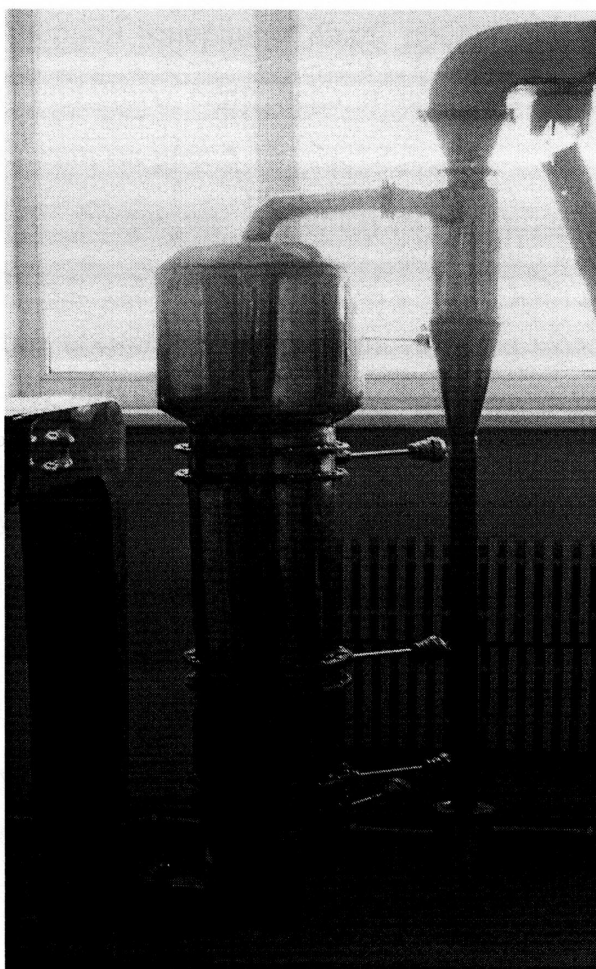


Рис. 5.15. Общий вид реактора метанирования на экспериментальном стенде

Дальнейшая очистка газа от кислот осуществляется в блоке очистки.

5.4. Система очистки газа

Наличие в полученном генераторном газе мелкодисперсных частиц, экологически вредных химических фракций требует проведение дополнительных технологических операций. После метанирования осуществляется очистка газа, которая включает в себя:

- очистку газа от мелкодисперсных твердых частиц с помощью водяного скруббера и водозмульсионного фильтра;
- очистку от кислот с помощью щелочи.

Для проведения первой операции был предложен технологический модуль, состоящий из водяного скруббера и водозмульсионного фильтра, общий вид которого показан на рис. 5.16.

Для последующей операции используем технологический модуль щелочной очистки газа.

Схему организации технологической очистки газа можно в общем виде описать как совокупность термодинамического и механического процессов. Хладоген (вода) подается насосом в жикостно-газовый эжектор и впрыскивается в камеру эжектирования.

При смешении воды с засасываемым газом происходит ее охлаждение от температуры $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ после реактора метанирования до температуры окружающей среды. После эжектора газ поступает в циклон, где происходит отделение твердых частиц в виде сажи и других компонентов. Общий вид технологической установки очистки газа показан на рис. 5.17.



Рис. 5.16. Технологический модуль очистки мелкодисперсных твердых частиц



Рис. 5.17. Установка очистки газа

5.5. Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом утилизации отходов

Для мониторинга и управление технологическим процессом утилизации твердых углеродсодержащих отходов усовершенствована автоматизированная система управления (АСУТП). Основная функция АСУТП контроль, фиксация, документирование и архивирование всех параметров технологического процесса. При этом учитывается возможность оперативного реагирования на изменение в технологическом процессе утилизации отходов. Общий принцип построения АСУТП основан на использовании совместимых программных продуктов с существующими стандартами.

5.5.1. Общая схема автоматизированной системы управления технологическим процессом утилизации

Мониторинг и управление технологическим процессом утилизации отходов осуществляется с помощью разработанной автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) на рабочем месте оператора-технолога. Показания датчиков, размещенных по тракту техпроцесса, передаются на компьютер, с которого оператор управляет процессом. Схема подключения приборов к компьютеру показана на рис. 5.18.

В данной АСУТП для считывания данных использованы устройства ввода МВА-8, которые передаются с помощью последовательного интерфейса RS-485 на преобразователь АС-4, преобразующий RS-485/USB типа.

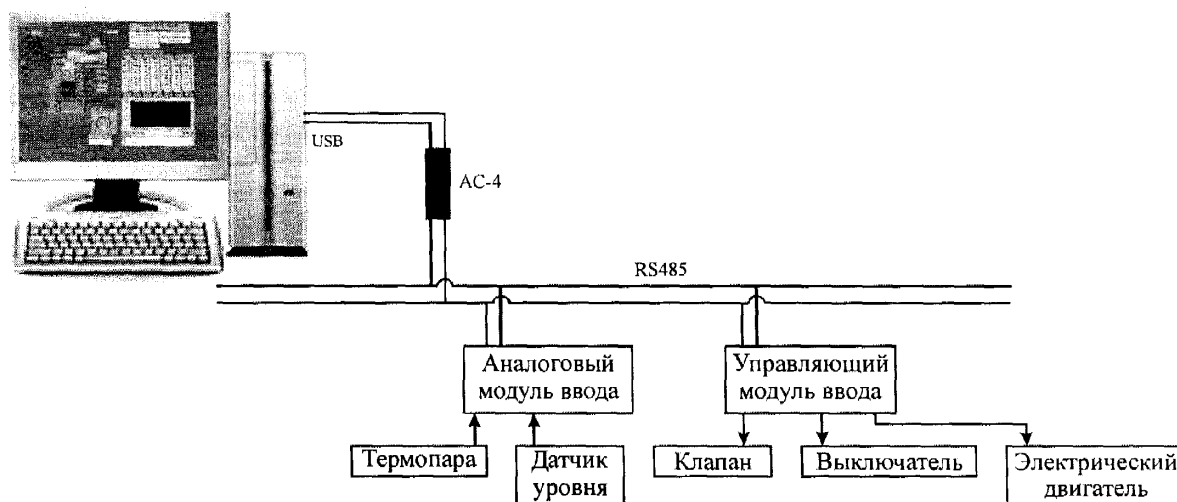


Рис. 5.18. Схема подключения приборов в АСУТП к установке утилизации отходов

Предлагаемое устройство ввода преобразует аналоговые сигналы, получаемые с датчиков в дискретные, которые передает по сети RS-485. Данное устройство оснащено восемью универсальными входами, к которым в произвольной комбинации могут быть подключены любые из следующих первичных преобразователей (датчиков):

– термопары ТХК(L), ТХА(К), ТНН(N), ТЖК(J), ТПП(R), ТПИ(S), ТПР(V), ТВР(A_1), ТВР(A_2), ТВР(A_3), ТМК(T);

– активные датчики с унифицированным выходным сигналом тока 0...5 мА, 0(4)...20 мА или напряжения –50...+50 мВ, 0...1 В;

– элементы и устройства, имеющие «сухой» контакт (к каждому входу можно подключить два таких устройства).

Преобразование сигналов интерфейса RS-485 в сигналы USB осуществляется с помощью преобразователя АС-4. В качестве кабеля использован кабель «витая пара» типа FTP.

Создание проекта АСУТП осуществлялось в единой интегрированной среде разработки (ИС) TRACE MODE 6, которая представляет собой SCADA-систему (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское

управление и сбор данных) и работает под управлением операционной системы MS Windows. Интегрированная среда TRACE MODE 6 включает в себя инструментальную систему.

Конечным результатом работы инструментальной системы TRACE MODE 6 является набор файлов, предназначенных для исполнения задач АСУ в мониторах реального времени на рабочем месте оператора (АРМ), который осуществляет мониторинг и управление процессом утилизации отходов жизнедеятельности. Существует две линии продуктов TRACE MODE 6 – базовая и профессиональная. Базовая ИС распространяется бесплатно. Для создания АСУТП процесса утилизации отходов использована базовая версия. Возможности данной версии достаточны для проведения экспериментальных и отладочных работ. Подключение модулей МВА-8 и МВУ-8 осуществлено по протоколу.

5.5.2. Мониторинг технологического процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов

Весь технологический процесс утилизации твердых углеродсодержащих отходов отображен в виде отдельных графических экранов на мониторе, соответствующих различным стадиям процесса. На каждом экране показаны типы датчиков и места их расположения и выводятся показания измеряемых величин, как в цифровом виде, так и в виде временных графиков (трендов). Кроме того, отображаются также устройства управления процессом в виде кнопок, тумблеров и т.д., которые позволяют управлять соответствующими механизмами – электродвигателями, клапанами, насосами, выключателями непосредственно на АРМ. В случае возникновения аварийных ситуаций или превышения предельных параметров на экране имеются сигналы типа алармов, которые необходимы для принятия соответствующих мер по управлению процессом.

На рис. 5.19. показан снимок графического экрана термохимической газификации. На нем схематично показан газогенератор с шахтой с размещенным в ней перерабатываемым сырьем, с характерными для процесса слоями.

На уровне каждого слоя размещены термопары T1...T4, кроме того на уровне выхода из плазмотрона дожигания газа установлена термопара T5 и на выходе из газогенератора – термопара T7. Термопара T6 зарезервирована для последующих экспериментов. Показания термопар отображаются в цифровом виде справа от номера термопары и снизу шкалы измерения. Кроме того, более наглядно показания отображаются на ряде шкал T1...T7 и на временных графиках (трэндах) внизу справа.

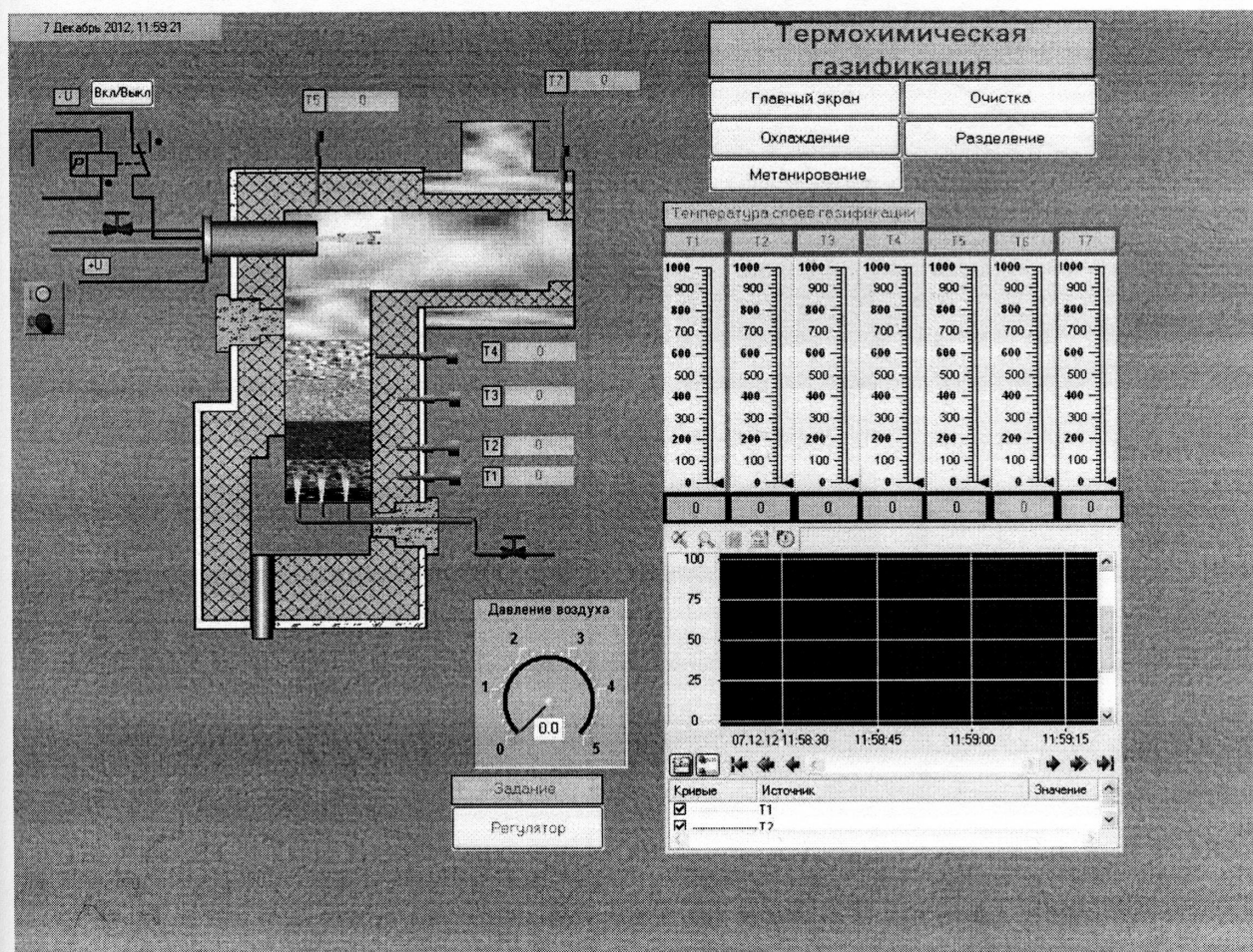


Рис. 5.19. Графический экран блока термохимической газификации

Система управления позволяет задавать давление воздуха, подаваемого от компрессора для осуществления процесса сгорания сырья в нижнем слое. Включение блока питания плазмотрона осуществляется оператором АРМ с помощью кнопки на экране. Дополнительно оператор может регулировать величину тока, подаваемого на плазмотрон.

Графический экран блока охлаждения приведен на рис. 5.20. Здесь осуществляется измерение температуры перед и после охлаждением и расхода воды, который может регулироваться. Показания отображаются, как в цифровом виде, так и в виде трэндов.

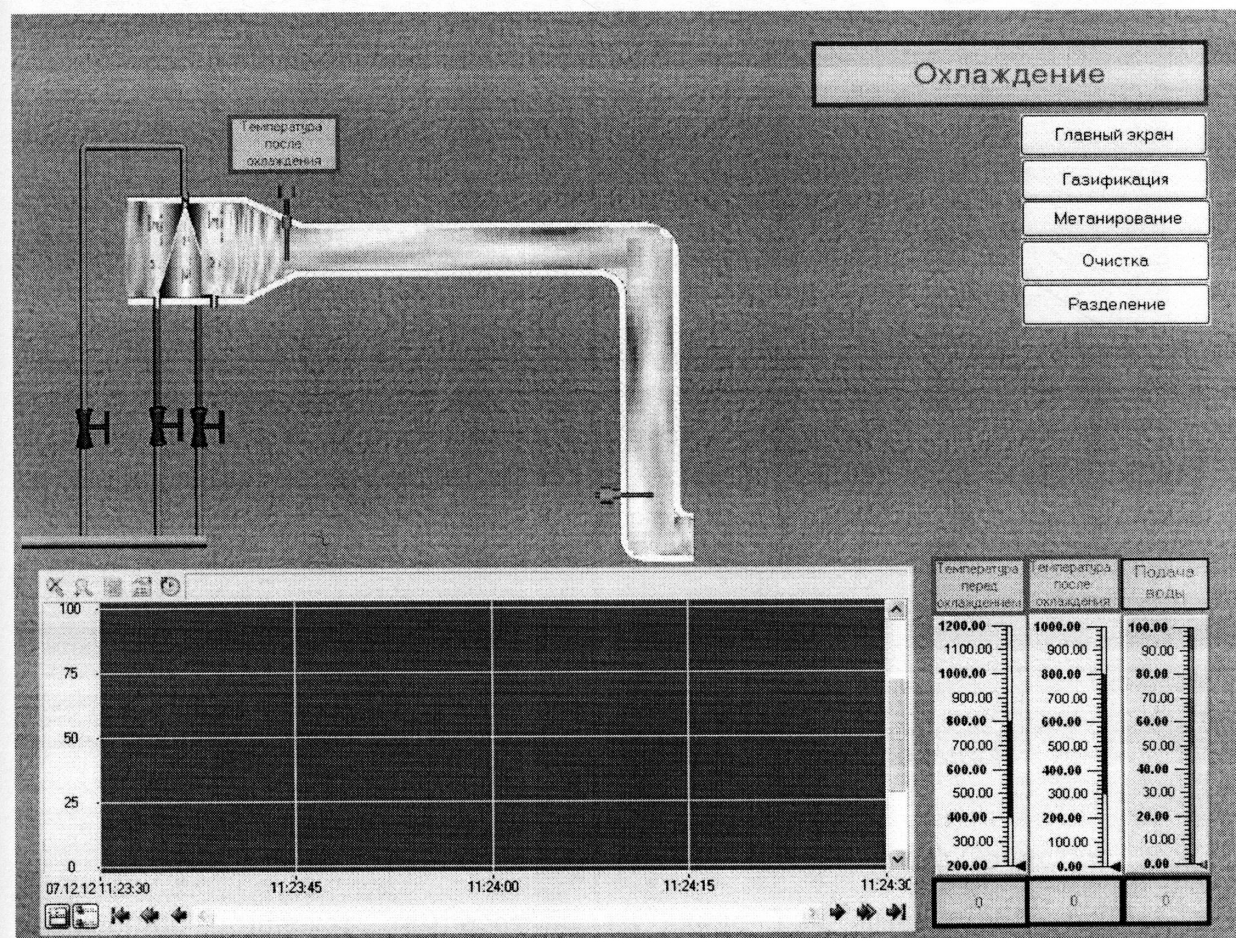


Рис. 5.20. Графический экран блока охлаждения и газоотведения

Мониторинг процесса метанирования осуществляется с помощью графического экрана, приведенного на рис. 5.21. Здесь отображаются показания термомпар T1...T5, расположенные снизу вверх по ходу движения газа. Показания также отображаются в цифровом виде и на трэндах. Кроме того осуществляется управление насосом подачи воды, необходимой при превышении уровня температур в процессе выше 300°C.

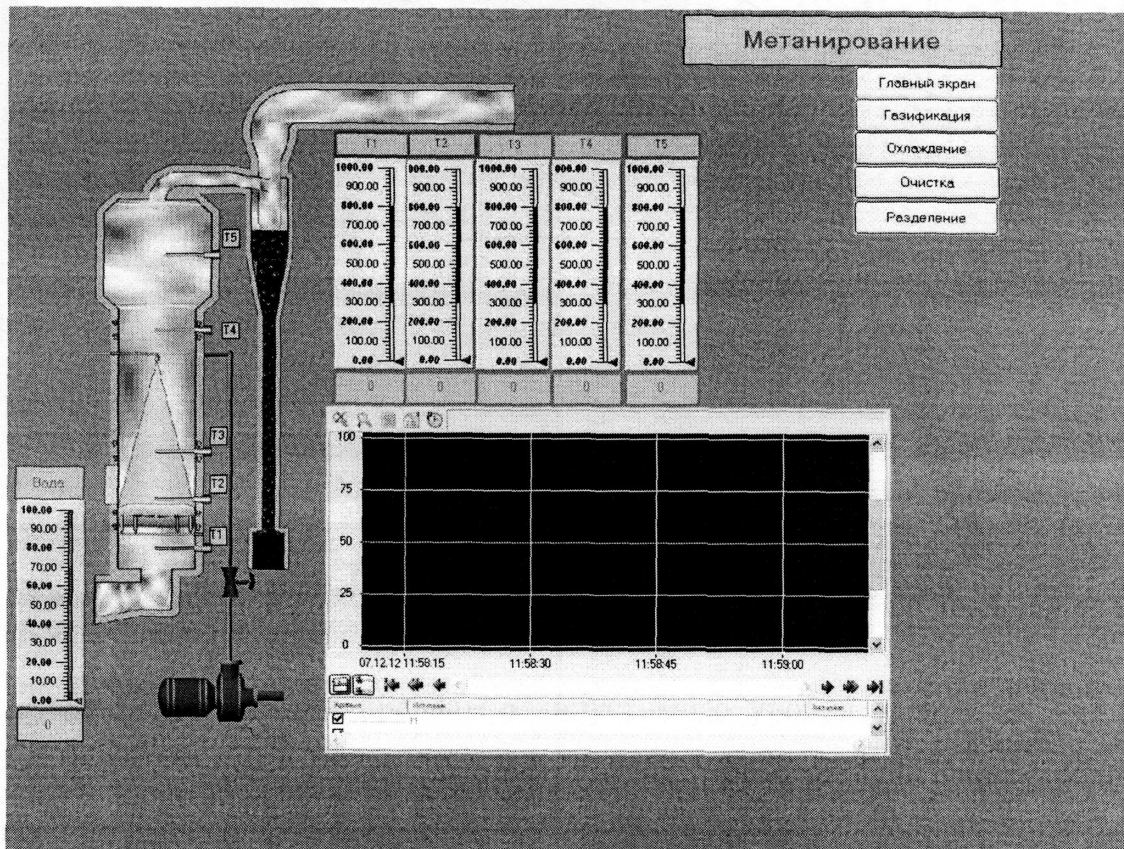


Рис. 5.21. Графический экран блока метанирования

На рис. 5.22 показан графический экран блока очистки газа. Измерению подлежат: температуры на входе T_{вх}, смешанного потока в эжекторе T_с и на выходе из блока очистки T_{вых}. Кроме того, измеряются давления на входе P_{вх}, смешанного потока в эжекторе P_с. Предусмотрено также измерение расхода воды, подаваемой в эжектор G_{воды}, расходы щелочной жидкости из бачка G_{жидк.} Кроме того контролируются уровни жидкости в бачке и воды в баке.

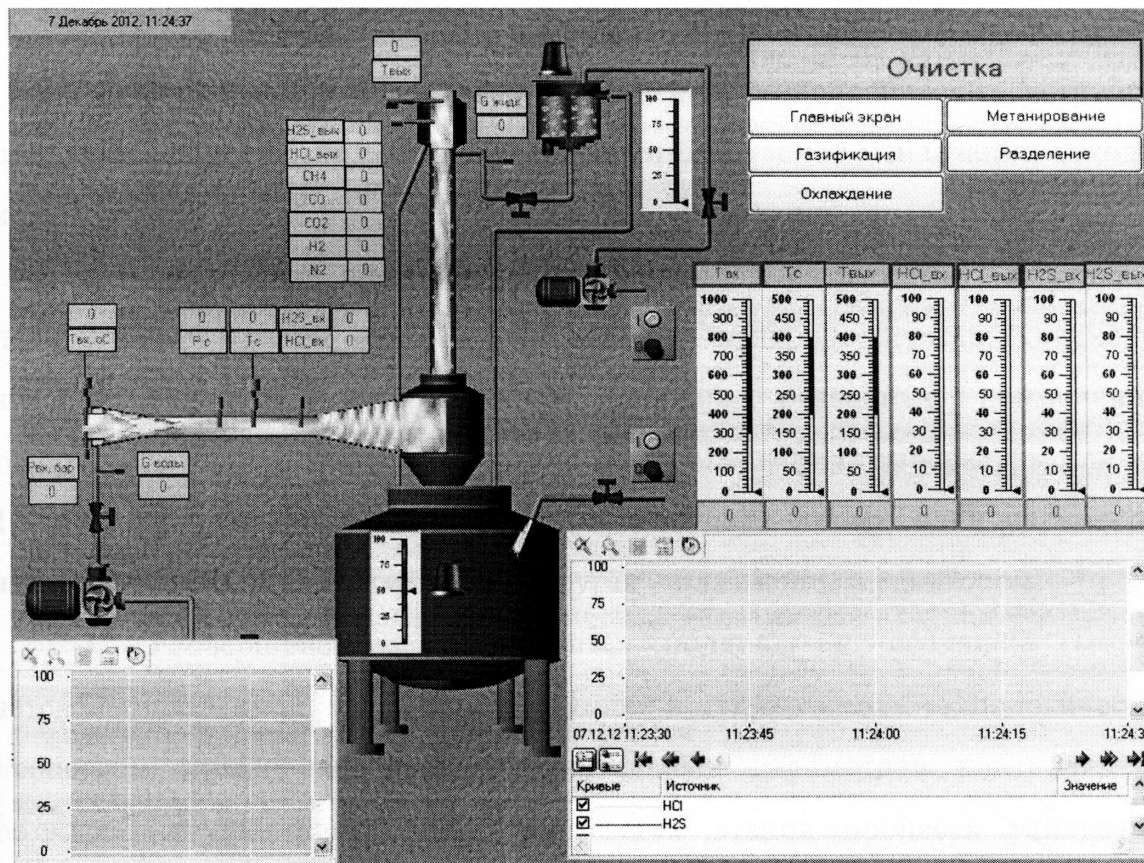


Рис. 5.22. Графический экран блока очистки газа.

При превышении предельно допустимого уровня загорается красная сигнальная лампа тревоги. В этом случае отключаются насосы подачи жидкости и воды с помощью выключателей на схеме. Показания приборов отображаются на трэндах. Измерения состава газа может производиться с помощью соответствующих приборов, их показания также выводятся на экран.

Данная автоматизированная система управления технологическим процессом утилизации отходов, что позволяет осуществлять мониторинг всех его этапов и обеспечивает возможность интегрирования ее в общую систему обеспечения экологической безопасности.

5.6. Выводы по разделу

1. Обоснованы конструктивные решения технологических устройств, обеспечивающих реализацию экологически безопасной утилизации отходов, и даны практические рекомендации по их применению.

2. В результате проведенных исследований разработана конструкция печи для смешанной газификации твердых углеродсодержащих отходов, которая учитывает экстремальные условия, созданные применением генераторов плазмы как источников тепла для создания температуры близкой 1200°C , при этом печь выполнена в виде двух камер, одна из которых является реактором газификации, а другая – плазменным реактором.

3. Усовершенствованы научные подходы к созданию модели автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом путем введения дополнительных параметров контроля, что позволяет осуществлять мониторинг всех этапов процесса утилизации отходов и обеспечивает возможность ее интеграции в общую систему обеспечения экологической безопасности.

РАЗДЕЛ 6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ И ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Численный эксперимент становится одним из наиболее экономичных и удобных способов детального анализа сложных процессов в газовых и газодисперсных средах.

Результаты численного эксперимента оросительного охлаждения генераторного газа путем впрыскивания диспергированной жидкости, а также процессов низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей, позволяют давать оценку эффективности режимов работы разрабатываемой технологической установки.

6.1. Численное моделирование процессов в испарительном теплообменнике

6.1.1. Расчетная область испарительного теплообменника и расчетная сетка

При моделировании процесса охлаждения генераторного газа впрыскиванием воды центробежными форсунками в горячий поток исследуем расчетную область, которая охватывает фрагмент пространства, ограниченный стенками теплообменника, ее входным и выходным сечениями (рис. 6.1 – 6.4). Рассматривалось несколько вариантов подачи воды форсунками в испарительный теплообменник.

Схематично расчетная область численного эксперимента представлена на рис. 6.4. Расположение форсунок отмечено крестом; цифрами 1, 2, 3, 4 – указаны номера контрольных сечений. Граница выходного патрубка совпадает с сечением 4.

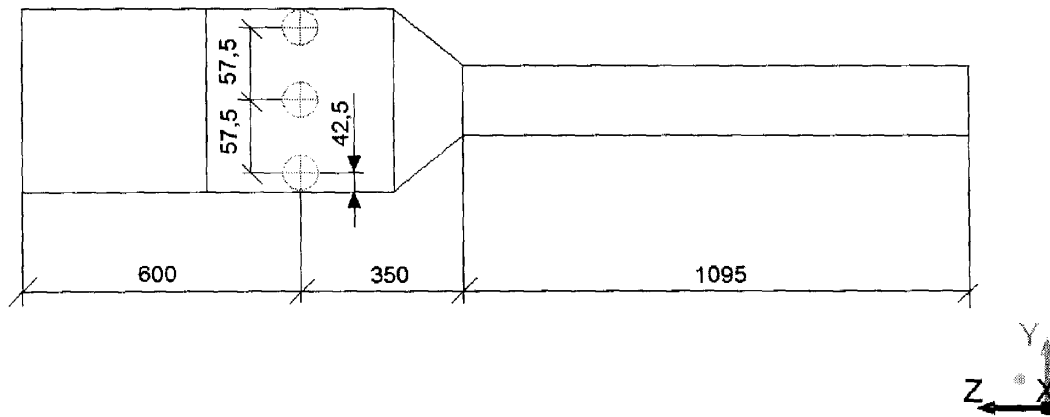


Рис. 6.1. Расчетная область (вид справа)

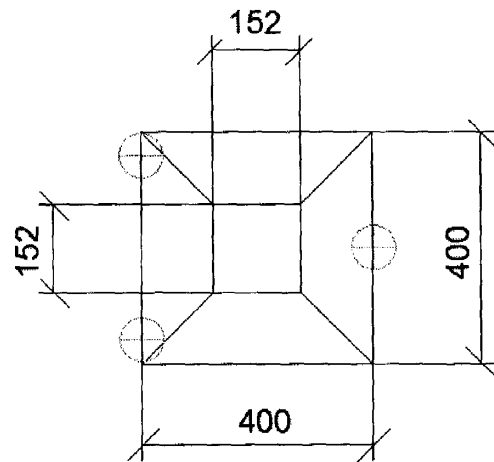


Рис. 6.2. Расчетная область (вид спереди)

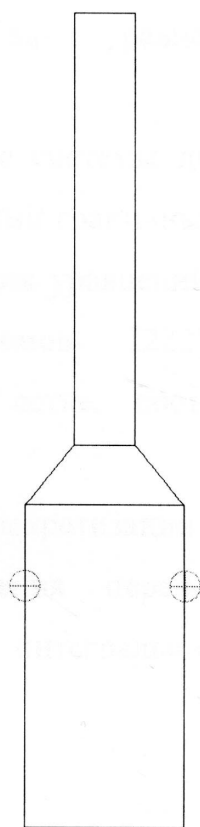


Рис. 6.3. Расчетная область (вид снизу)

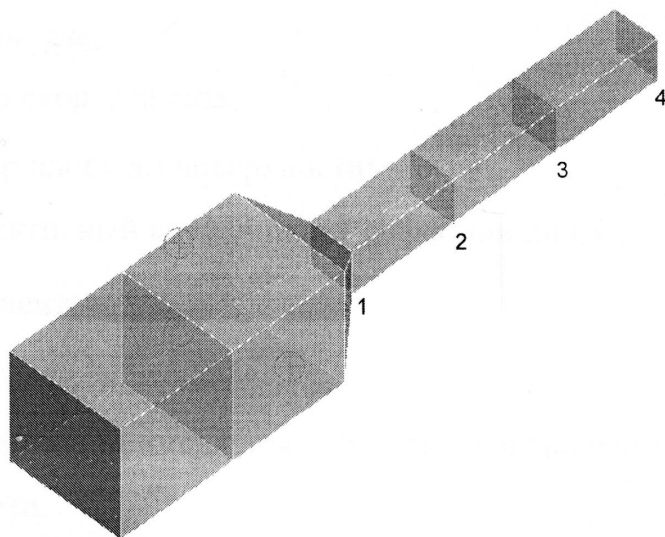


Рис. 6.4. Расчетная область (изометрия).

Расчетная область покрывалась неравномерной расчетной сеткой, включавшей 77087 полиэдрических ячеек.

6.1.2. Численное интегрирование уравнений газовой фазы

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений в частных производных с заданными граничными условиями предусматривает их дискретизацию. Дискретизация уравнений по пространству выполнялась методом контрольных объемов [222] на неструктурированной (неупорядоченной) расчетной сетке, составленной из полиэдрических элементарных объемов – ячеек.

Рассмотрим алгоритм дискретизации управляющих уравнений на примере обобщенного уравнения переноса произвольной скалярной величины ϕ , записанного в интегральной форме для произвольного контрольного объема V :

$$\oint \rho \bar{u} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \iiint_V S_{\phi} dV, \quad (6.1)$$

где ρ – плотность газа;

\bar{u} – вектор скорости газа;

\vec{A} – вектор площади поверхности;

Γ_{ϕ} – эффективный коэффициент диффузии для ϕ ;

$\nabla \phi$ – градиент ϕ ;

S_{ϕ} – член типа источника.

Уравнение (6.1) применяется к каждому контрольному объему – ячейке расчетной области.

Дискретизация уравнения (6.1) на такой ячейке дает

$$\sum_f^{N_f} \rho_f \bar{u}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_f} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V, \quad (6.2)$$

где N_f – количество граней, ограничивающих ячейку;

$\rho_f \bar{u}_f \cdot \bar{A}_f$ – поток массы через грань f ;

\bar{A}_f – площадь грани f ;

ϕ_f – величина, переносимая конвекцией через грань f ;

$(\nabla\phi)_n$ – величина $\nabla\phi$, нормальная к грани f ;

V – объем ячейки.

Дискретные значения скаляра ϕ определяются в центрах контрольных ячеек. Значения ϕ_f на гранях ячеек, необходимые для вычисления конвективных членов в уравнении (6.1), определяются путем интерполяции значений ϕ в центрах контрольных ячеек. Это осуществляется с помощью односторонней разностной схемы «против потока», в которой ϕ_f вычисляется по ϕ в центре ячейки, лежащей выше по течению относительно направления нормальной скорости u_n в уравнении (6.1). Для построения схемы первого порядка точности значения переменных принимаются постоянными в объемах, разделенных гранью. Для построения схем более высокого порядка точности переменные экстраполируются на поверхности ячеек с применением разложения в ряд Тейлора по значению в центре ячейки:

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \bar{r}, \quad (6.3)$$

где ϕ – величина переменной в центре ячейки;

$\nabla\phi$ – градиент переменной в ячейке, лежащей выше по потоку;

\bar{r} – вектор, начало которого находится в центре ячейки, а конец – в центре грани.

Для определения градиента $\nabla\phi$ данные вначале интерполируются на узлы, а затем по теореме Остроградского – Гаусса определяется градиент:

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f N_f \bar{\phi}_f \bar{A}_f, \quad (6.4)$$

где $\bar{\phi}_f$ – средняя величина по двум смежным ячейкам, разделенным гранью f .

Для аппроксимации диффузионных членов в уравнении (6.1) используются центральные разности второго порядка точности

$$\phi_{fCD} = \frac{1}{2}(\phi_0 + \phi_1) + \frac{1}{2}(\nabla\phi_{r0} \cdot \vec{r}_0 + \nabla\phi_{r1} \cdot \vec{r}_1), \quad (6.5)$$

где индексы «0» и «1» относятся к смежным ячейкам с общей гранью f ;

$\nabla\phi_{r0}$ и $\nabla\phi_{r1}$ – восстановленные описанным выше способом градиенты переменной ϕ в ячейках 0 и 1 соответственно;

\vec{r} – вектор, начало которого находится в центре ячейки, а конец – в центре грани.

Дискретный аналог (6.3) содержит наряду с неизвестной переменной ϕ в центре ячейки, также неизвестные величины в соседних ячейках. В общем случае уравнение является нелинейным. Линеаризованная форма уравнения (6.3) может быть представлена как

$$a_r\phi = \sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b, \quad (6.6)$$

где индекс «nb» относится к центрам соседних ячеек;

a_r и a_{nb} – линеаризованные коэффициенты для ϕ и ϕ_{nb} соответственно.

Число соседних ячеек равно числу граней ячейки. Аналогичные уравнения можно записать для каждой ячейки расчетной сетки. В результате получается система алгебраических квазилинейных уравнений вида

$$AX = B, \quad (6.7)$$

где A – матрица коэффициентов алгебраических уравнений;

X – вектор неизвестных;

B – вектор правых частей.

Система (6.7) решается итерационным методом Гаусса – Зейделя.

Дискретный аналог (6.6) в действительности является нелинейным, так как коэффициенты a и b меняются по итерациям. Поэтому для обеспечения сходимости накладывается дополнительное условие, заключающееся в том, что a и b должны мало меняться от итерации к итерации. Этому условию можно удовлетворить с помощью метода нижней релаксации:

$$\phi = \phi^{n-1} + \alpha_n (\phi^n - \phi^{n-1}), \quad (6.8)$$

где n – номер итерации;

$\alpha_n = 0 \dots 1$ – параметр нижней релаксации.

Описанная выше схема дискретизации уравнения переноса произвольной скалярной величины ϕ применяется также для дискретизации уравнений сохранения количества движения и уравнения неразрывности.

Например, уравнение для x -компоненты количества движения можно получить, полагая $\phi = u_1$:

$$a_p u_1 = \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{nb} u_{1nb} + \sum_f^{N_f} p_f A_f \cdot \hat{i} + S, \quad (6.9)$$

где индекс «P» относится к центру ячейки, «f» – к граням ячейки, «nb» – к центрам соседних ячеек; \hat{i} – единичная матрица.

Дискретный аналог уравнения неразрывности имеет вид

$$\sum_f^{N_f} J_f A_f = \Delta S_m, \quad (6.10)$$

где $J_f = \rho u_n$ – поток массы через грань f .

Поток массы через грань J_f определяется как

$$J_f = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}), \quad (6.11)$$

где p_{c0} и p_{c1} – давления в двух ячейках, расположенных по разные стороны от грани f (см. рис. 6.2), а \hat{J}_f содержит влияние скоростей в этих ячейках.

Член d_f является функцией от \bar{a}_p – среднего по двум ячейкам, расположенным по разные стороны от грани f , значения коэффициента a_p в уравнении сохранения количества движения (6.9).

Если поле давления и потоки массы на гранях известны, то уравнение (6.9) может быть решено способом, аналогичным использованному выше для уравнения (6.1), в результате чего можно получить поле скорости. Однако, поле давления и потоки массы на гранях заранее не известны и должны быть получены в результате решения.

Уравнения сохранения количества движения и неразрывности решаются последовательно. В этой последовательной процедуре уравнение сохранения количества движения используется как уравнение для давления. Однако, для несжимаемых течений (в пределе малых чисел Маха) давление не появляется явно в уравнении неразрывности (6.10), поскольку плотность явно не зависит от давления. Для введения давления в уравнение неразрывности используется процедура коррекции давления SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [301], в которой связь между давлением и скоростью достигается путем использования уравнения (6.8) для решения уравнения для давления, получаемого из дискретного аналога (6.10)

уравнения неразрывности. Алгоритм SIMPLE использует соотношение между скоростью и поправками к давлению для навязывания условия сохранения массы и получения поля давления. Если уравнение сохранения количества движения решается по предварительному полю давления p^* , получающийся в результате поток на грани J_f^* , вычисленный по уравнению (6.11)

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*), \quad (6.12)$$

не удовлетворяет уравнению неразрывности. Для устранения этого к потоку J_f^* прибавляется поправка J'_f , такая, чтобы скорректированный поток J_f удовлетворял уравнению неразрывности:

$$J_f = J_f^* + J'_f, \quad (6.13)$$

Используется следующее выражение для поправки J'_f

$$J'_f = d_f(p'_{c0} - p'_{c1}), \quad (6.14)$$

где p' – поправка к давлению в ячейке.

Подстановка выражения (6.13) и (6.14) в дискретный аналог (6.10) приводит к следующему выражению p' :

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b, \quad (6.15)$$

где источниковый член b представляет собой массовый расход газа через ячейку

$$b = \sum_f^{N_f} J_f^* A_f. \quad (6.16)$$

Уравнение для поправки к давлению (6.15) решается итерационным методом Гаусса – Зейделя. После получения решения давление в ячейке и поток через грань корректируются по формулам

$$p = p^* + \alpha_p p', \quad (6.17)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}), \quad (6.18)$$

где α_p – коэффициент нижней релаксации для давления.

Скорректированный поток J_f точно удовлетворяет уравнению неразрывности на каждой итерации.

6.1.3. Обеспечение устойчивости, сходимости и точности численного решения

Устойчивость численного решения может быть обеспечена применением метода нижней релаксации независимых переменных (см. уравнение (6.17)).

Количество итераций необходимых для решения стационарных задач аэрогидродинамики определяется как алгоритмом разностной схемы, так и критерием оценки сходимости решения. Используемые исследователями критерии сходимости решения можно классифицировать следующим образом.

1. Определение невязки для каждого решаемого дифференциального уравнения. В этом случае, как правило, для достижения сходимости всего

решения необходимо для каждого разностного уравнения обеспечить заданный уровень невязки.

2. Интегральная невязка. В данном случае для всех уравнений определяется единый критерий, позволяющий анализировать сходимость решения.

Для оценки сходимости в предлагается применять интегральный критерий относительно вектора консервативных переменных.

Условие сходимости решения можно представить в следующем виде

$$\sqrt{\frac{\sum R_i^2}{V^2}} \leq \varepsilon, \quad (6.19)$$

R_i – невязки для разностных уравнений, моделирующих перенос независимых переменных;

V – объем расчетной ячейки;

ε – критерий сходимости.

Численное решение может считаться сошедшимся, если выполняется одно из следующих условий:

- выполняется условие (6.19);
- решение больше не изменяется при продолжении итераций.

В качестве альтернативного критерия сходимости решения задач может приниматься пульсация значений отношения массового расхода во входном сечении к выходному.

Точность численного решения может оцениваться по степени выполнения критериев сходимости, степени независимости решения от размера расчетной сетки и степени качественного соответствия результатов расчета известным физическим представлениям.

Сеточная независимость решения может оцениваться путем сравнения численных результатов, полученных на нескольких расчетных сетках, различающихся количеством расчетных ячеек.

Таким образом, используя данный расчетный метод, можно определить параметры газа в любой точке расчетной области.

6.1.4. Численное интегрирование уравнений дисперсной фазы

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (4.17) – (4.18) с заданными начальными условиями выполнялось методом Рунге – Кутты 4-го порядка с переменным шагом, выбираемым по формуле

$$\Delta t = \frac{1}{\chi} \min(\Theta, \tau_a), \quad (6.20)$$

где χ – коэффициент «размельчения», задаваемый в зависимости от желаемой точности интегрирования;

τ_a – время аэродинамической релаксации, определяемое выражением

Θ – время тепловой релаксации, определяемое уравнением (6.33);

$$\tau_a = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}. \quad (6.21)$$

6.1.5. Подготовка начальных условий дисперсной фазы

В число необходимых условий однозначности системы дифференциальных уравнений дисперсной фазы входят начальные условия для капель, определяемые параметрами подачи воды форсунками.

Скорость истечения жидкости из сопла форсунки

$$v = \frac{G_{\text{ж}}}{C_D \rho_{\text{ж}} A_0}, \quad (6.22)$$

где $G_{\text{ж}}$ – массовый расход воды через форсунку ($G_{\text{ж}} = 0,0012$ кг/с);

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность воды ($\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³);

A_0 – площадь поперечного сечения сопла, определяемая по формуле:

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (6.23)$$

где d_0 – диаметр сопла.

Коэффициент расхода C_D и угол конуса распыла α определялись по геометрической характеристике форсунки $A_{\text{ф}}/(D_s d_0)$, представляющей собой отношение площади поперечного сечения входных каналов $A_{\text{ф}}$ к произведению диаметра камеры закручивания D_s и диаметра сопла d_0 , из рис. 6.5 [116].

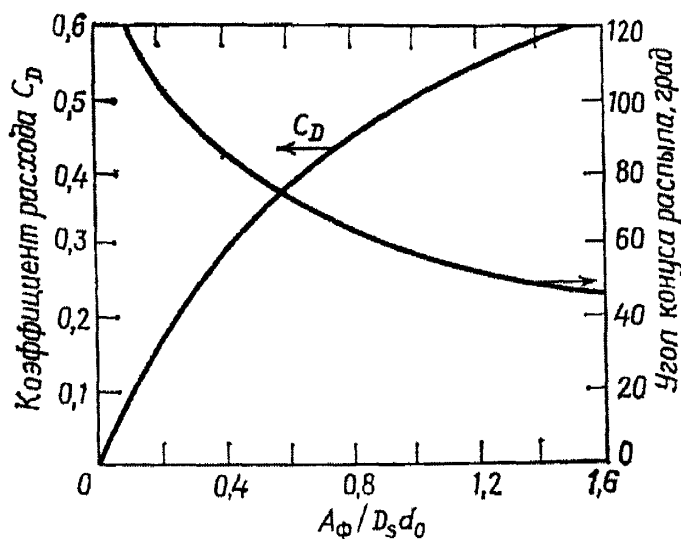


Рис. 6.5. Теоретические зависимости коэффициента расхода C_D и угла конуса распыла α от геометрической характеристики $A_{\text{ф}}/(D_s d_0)$ [116]

Рассмотрено три варианта подачи воды в газоотводящую трубу форсунками: исходный (№ 1) и два гипотетических (№ 2 и № 3), различающиеся мелкостью распыливания воды и скоростью ее истечения из сопла.

Для варианта № 1 подачи воды геометрическая характеристика форсунки $A_{\phi}/(D_s d_0)$ определялась по размерам, приведенным на рис. 6.6, а именно $D_{\phi} = 0,001$ м, $D_s = 0,0035$ м, $d_0 = 0,0006$ м.

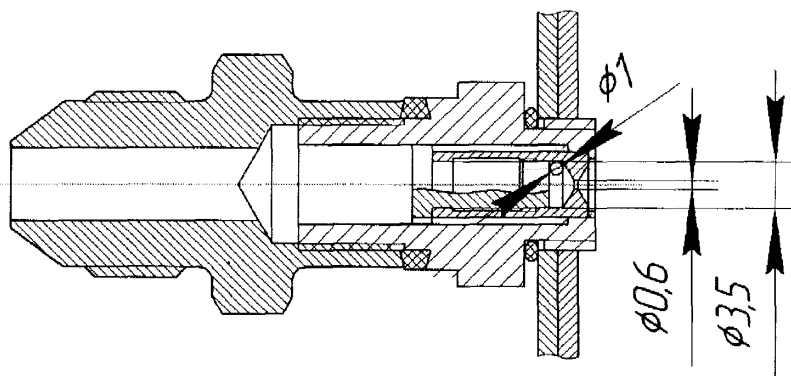


Рис. 6.6. Форсунка (вариант № 1)

Для вариантов № 2 и № 3 подачи воды геометрическая характеристика форсунки $A_{\phi}/(D_s d_0)$ и диаметр сопла d_0 были приняты такими, которые обеспечивают желаемую мелкость распыливания воды.

Перепад давления на форсунке [187]

$$\Delta p = \frac{Q_{\text{ж}}^2 \rho_{\text{ж}}}{2(C_D A_0)^2}, \quad (6.24)$$

где $Q_{\text{ж}}$ – объемный расход воды ($Q_{\text{ж}} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м³/с).

Форму распада струи однозначно характеризует число Рейнольдса [223]

$$\text{Re}_3 = \frac{v d_3}{\nu_{ж}}, \quad (6.25)$$

где v – скорость истечения жидкости из сопла форсунки;

$d_3 = \sqrt{C_D} d_0$ – эквивалентный диаметр форсунки;

$\nu_{ж}$ – кинематическая вязкость воды ($\nu_{ж} = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

При $\text{Re}_3 \approx 1500$ струя истекает пузырьком, при $\text{Re}_3 = 2100 \dots 2500$ в центре струи появляются мелкие капли, что соответствует формам I – III, приведенным на рис. 6.7.

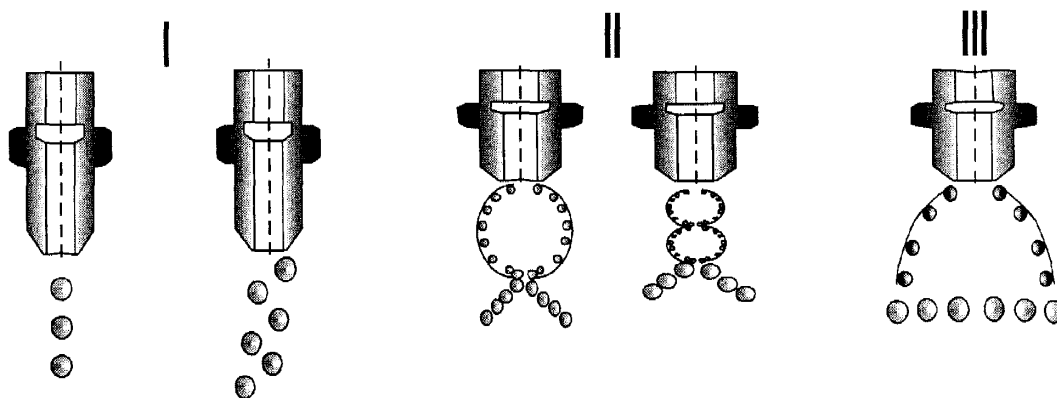


Рис. 6.7. Формы распада закрученных жидких струй и пленок при $\text{Re}_3 = 2500$

При $\text{Re}_3 = 2800 \dots 3000$ исчезает сплошная пленка струи [225]. Полученные значения числа Рейнольдса соответствуют формам IV – VI, приведенным на рис. 6.8.

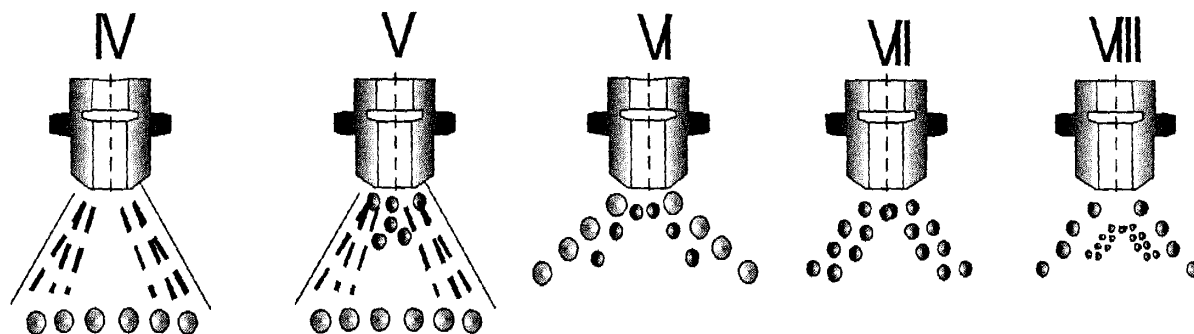


Рис. 6.8. Формы распада закрученных жидких струй
и пленок $Re_3 = 3000$

Распределение размеров капель в распыленной струе основано на данных [293] и хорошо описывается формулой Розина – Раммлера.

Численные значения параметров подачи воды форсунками, определенные описанным выше методом, для трех вариантов подачи воды (исходного (№ 1) и двух гипотетических (№2 и № 3)) сведены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1. Численные значения параметров подачи воды форсунками

Наименование параметра	Номер варианта		
	1	2	3
d_0 , м	0,0006	0,0009	0,0011
$A_\phi/(D_s d_0)$	0,75	1,3	1
C_D	0,43	0,56	0,50
α , град	66	50	57
v , м/с	10	3	3
Δp , Па	48228	5650	3189
Re_3	3858	2257	1957
d_{min} , м	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$55 \cdot 10^{-6}$	$202 \cdot 10^{-6}$
\bar{d} , м	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$144 \cdot 10^{-6}$	$514 \cdot 10^{-6}$
d_{max} , м	$25 \cdot 10^{-6}$	$234 \cdot 10^{-6}$	$802 \cdot 10^{-6}$
n	3,77	3,99	3,6

6.1.6. Расчет коэффициентов равномерности

Коэффициент равномерности γ_a показывает в какой степени параметр а парогазовой смеси (например температура или массовая доля водяного пара) изменяется в контрольном сечении. При отсутствии изменений (то есть при максимальной равномерности распределения параметра а) $\gamma_a = 1$.

Коэффициент равномерности вычислялся по следующей формуле:

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(\phi_i - \bar{\phi}_a) A_i]}{2|\bar{\phi}_a| \sum_{i=1}^n A_i}, \quad (6.26)$$

где i – индекс грани расчетной ячейки, принадлежащей контрольному сечению, включающему в себя n граней;

$\bar{\phi}_a$ – среднее по сечению значение параметра а, вычисляемое по формуле:

$$\bar{\phi}_a = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}. \quad (6.27)$$

6.1.7. Результаты численного моделирования процесса охлаждения генераторного газа установки утилизации твердых бытовых и опасных отходов

Результаты численного моделирования охлаждения генераторного газа впрыском воды центробежными форсунками в газоотводящую трубу для трех вариантов подачи воды показаны на рис. 6.9 – 6.44 и сведены в табл. 6.2 – 6.4.

Из рис. 6.9 – 6.13 видно, что в варианте № 1 представительные капли воды, первоначально подаваемые центробежными форсунками в проточную часть газоотводной трубы в виде конусообразного распыла, очень быстро (в непосредственной близости от места их впрыска) теряют свой начальный импульс и в дальнейшем следуют компактным «роем» вдоль линий тока газа (рис. 6.13 – 6.16), которые сильно искривлены в результате межфазного обмена импульсом. Возникающая при этом асимметрия течения (рис. 6.13 – 6.18) и соответственно асимметрия траекторий капель (рис. 6.9 – 6.12) обусловлена высокой чувствительностью относительно малоразмерных капель ($\bar{d} = 16,6$ мкм) к малым возмущениям (флуктуациям) скорости газа.

Кроме того из рис. 6.9 видно, что капли, впрыскиваемые с начальной температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в поток газа, имеющего температуру $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате процессов конвективного теплообмена и испарения при движении внутри газоотводной трубы принимают температуры от $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $58\text{ }^{\circ}\text{C}$, не достигая температуры кипения воды $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из рис. 6.9 – 6.13 также видно, что большая часть капель успевает испариться до входа в узкий участок газоотводной трубы, то есть до сечения № 1 (см. рис. 4.3, 4.4, 6.1, 6.2). Исключение составляет некоторая часть капель, порожденных форсункой № 2, которая испаряется в узком участке газоотводной трубы, а именно между сечениями № 1 и № 2. В результате численное значение средней массовой доли водяного пара $g_{\text{H}_2\text{O},\text{cp}}$ в парогазовой смеси в сечении № 1 оказывается существенно меньше равновесного, к которому данная величина стремится ниже по течению в сечениях № 2, № 3 и № 4 (табл. 6.2).

Соответственно численное значение средней температуры парогазовой смеси t_{cp} в сечении № 1 оказывается на 55°C больше равновесного ($454\text{ }^{\circ}\text{C}$), к которому указанная величина стремится ниже по течению – в сечениях № 2, № 3 и № 4 (см. табл. 6.2).

Температура парогазовой смеси и массовая доли водяного пара в ней неравномерно распределены по указанным выше сечениям, особенно в

сечении № 1 (рис. 6.19, 6.20), где коэффициенты равномерности составляют $\gamma_T = 0,8892$ и $\gamma_{H_2O} = 0,8804$ (см. табл. 6.2). При этом максимальная температура парогазовой смеси в сечении № 1, № 2, № 3 и № 4 превышает равновесную (454 °С) на 598 °С, 239 °С, 128 °С и 70 °С соответственно (табл. 6.2).

Таким образом, структура и параметры газокапельного потока не соответствуют задуманной схеме водяной завесы (см. рис. 6.1). Учитывая отмеченное выше, вариант № 1 подачи воды нельзя признать удовлетворительным.

Таблица 6.2. Значения параметров в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы для подачи воды варианта № 1

Наименование параметра	Номер сечения			
	1	2	3	4
z, м	-0,55	-0,912	-1,274	-1,6365
z, калибры	0	2,4	4,8	7,2
t_{\min} , °С	31,3	188,7	275,3	311,8
t_{cp} , °С	408,6	364,7	357,6	355,8
t_{\max} , °С	951,6	592,8	482,3	424,1
γ_T	0,8892	0,9422	0,9649	0,978
$g_{H_2O.\min}$	0,041	0,116	0,143	0,158
$g_{H_2O.\text{cp}}$	0,1666	0,1756	0,1769	0,1774
$g_{H_2O.\max}$	0,282	0,227	0,2	0,19
γ_{H_2O}	0,8804	0,9426	0,9653	0,9781

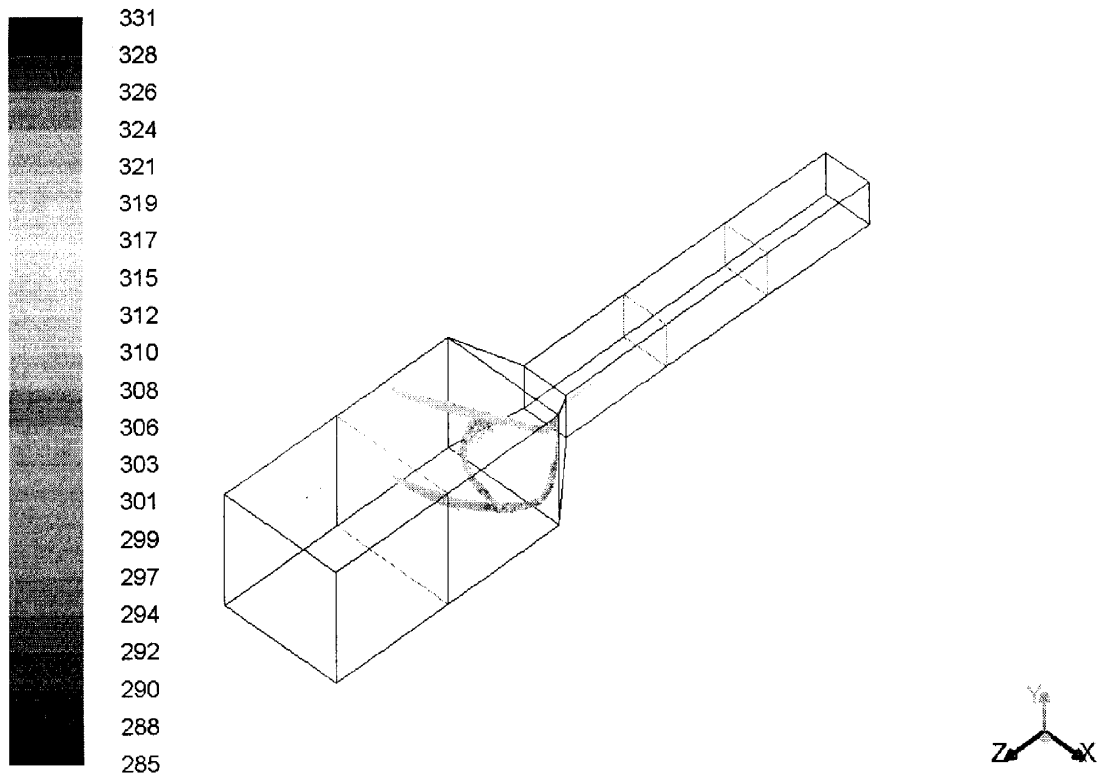


Рис. 6.9. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их температурой, К (вариант № 1, изометрия)

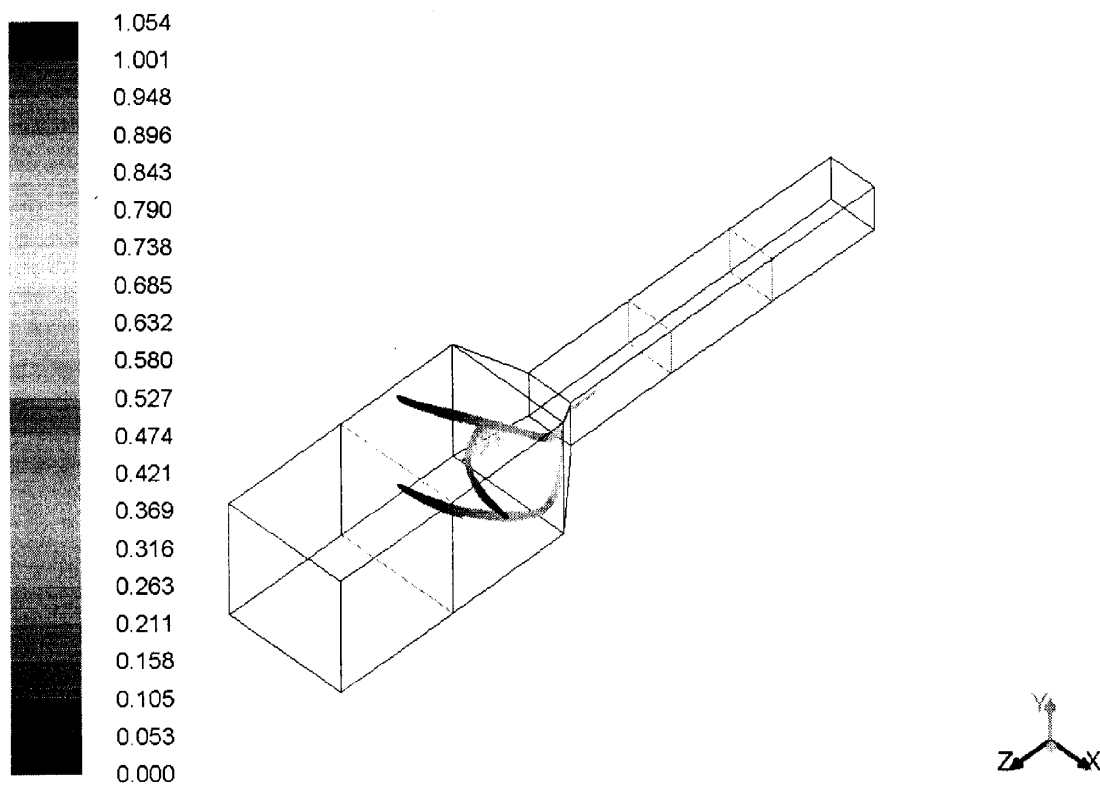


Рис. 6.10. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 1, изометрия)

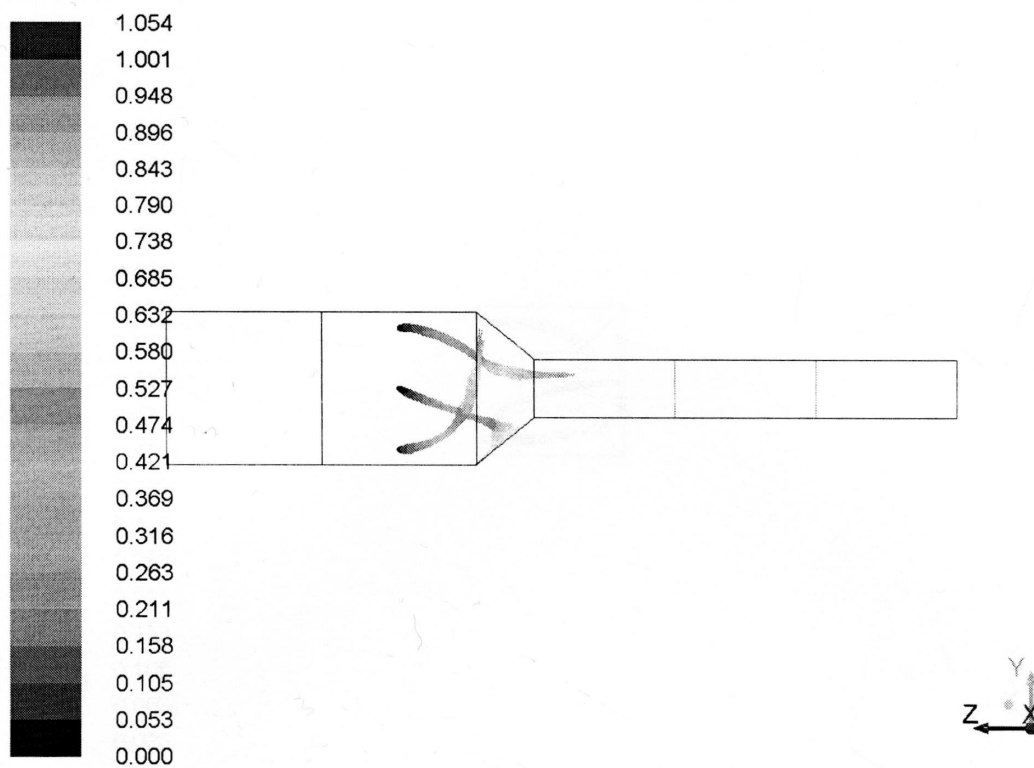


Рис. 6.11. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 1, вид справа)

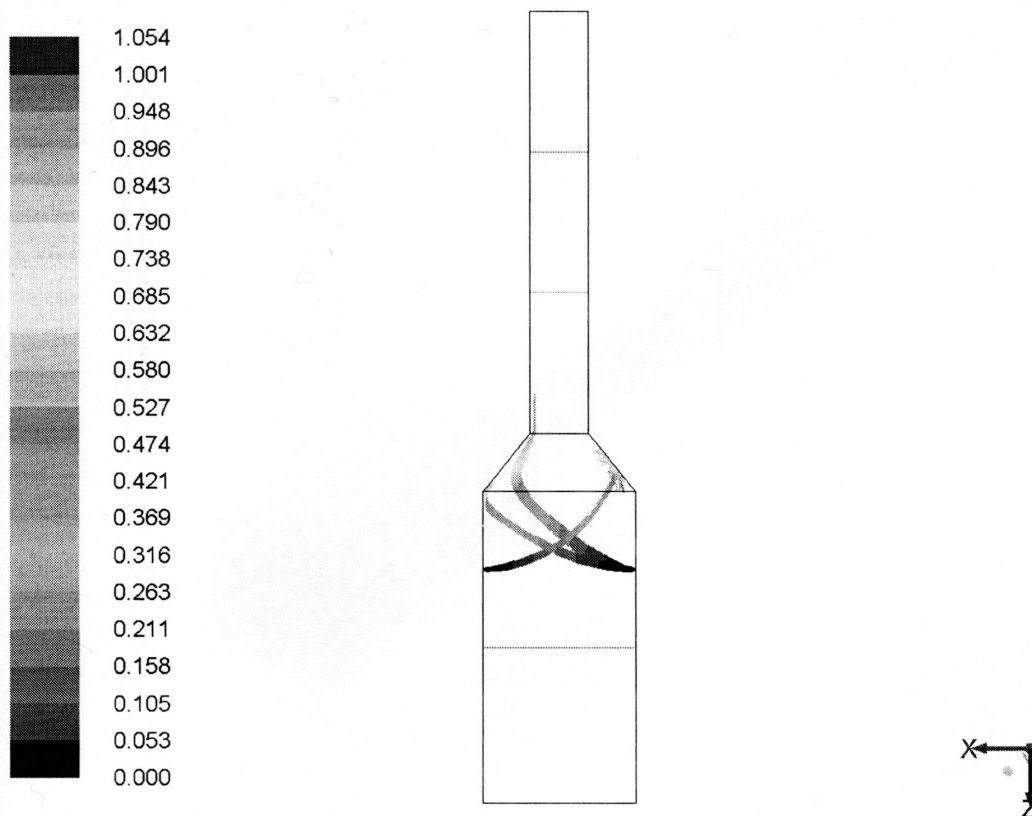


Рис. 6.12. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 1, вид сверху)

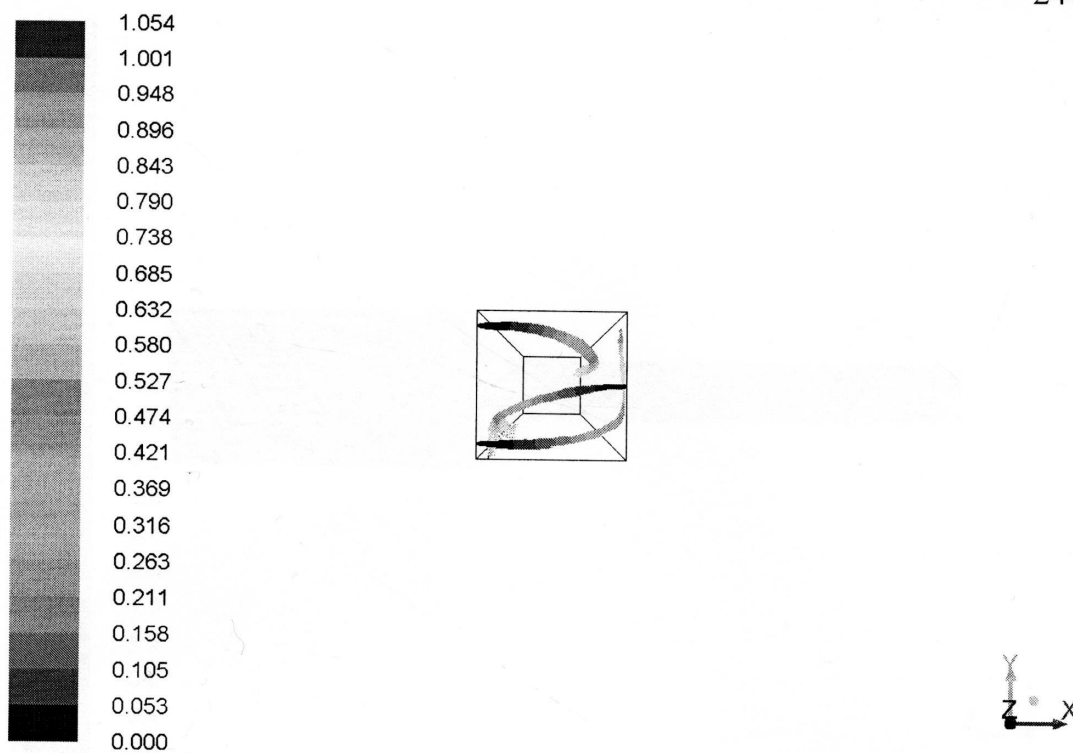


Рис. 6.13. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 1, вид спереди)

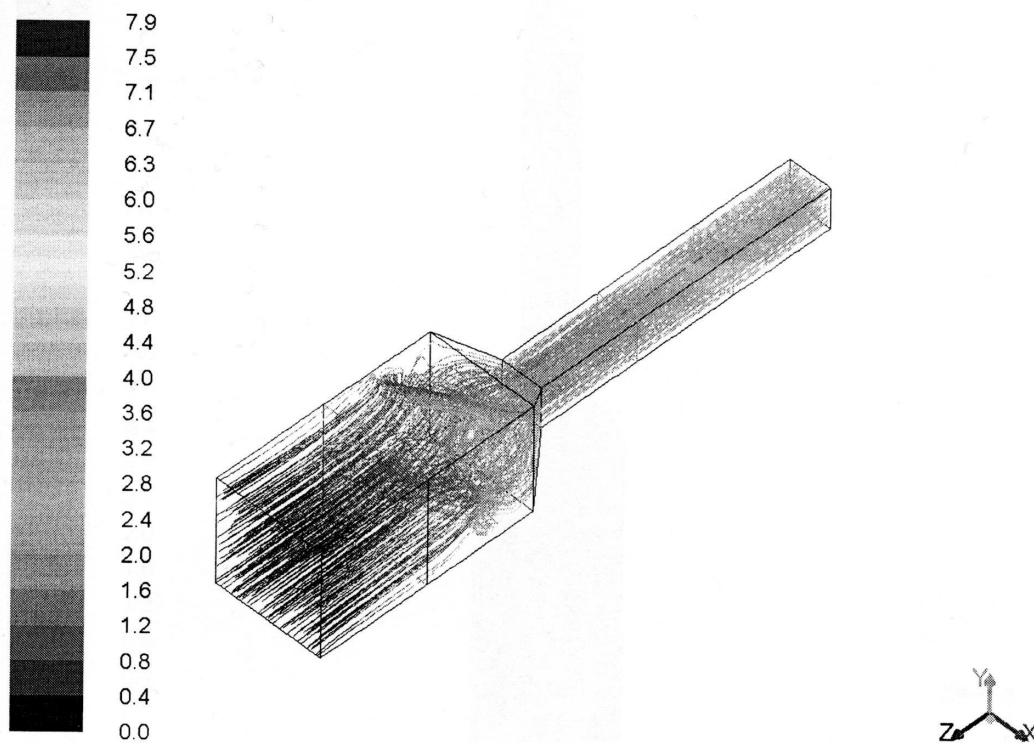


Рис. 6.14. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 1, изометрия)

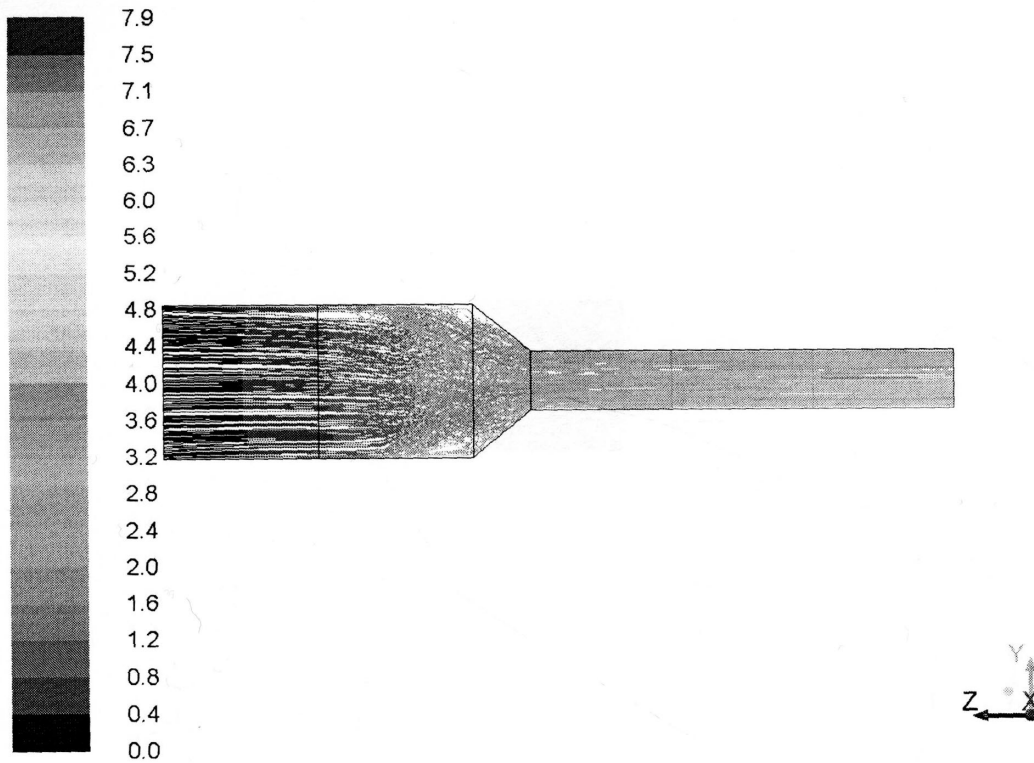


Рис. 6.15. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 1, вид справа)

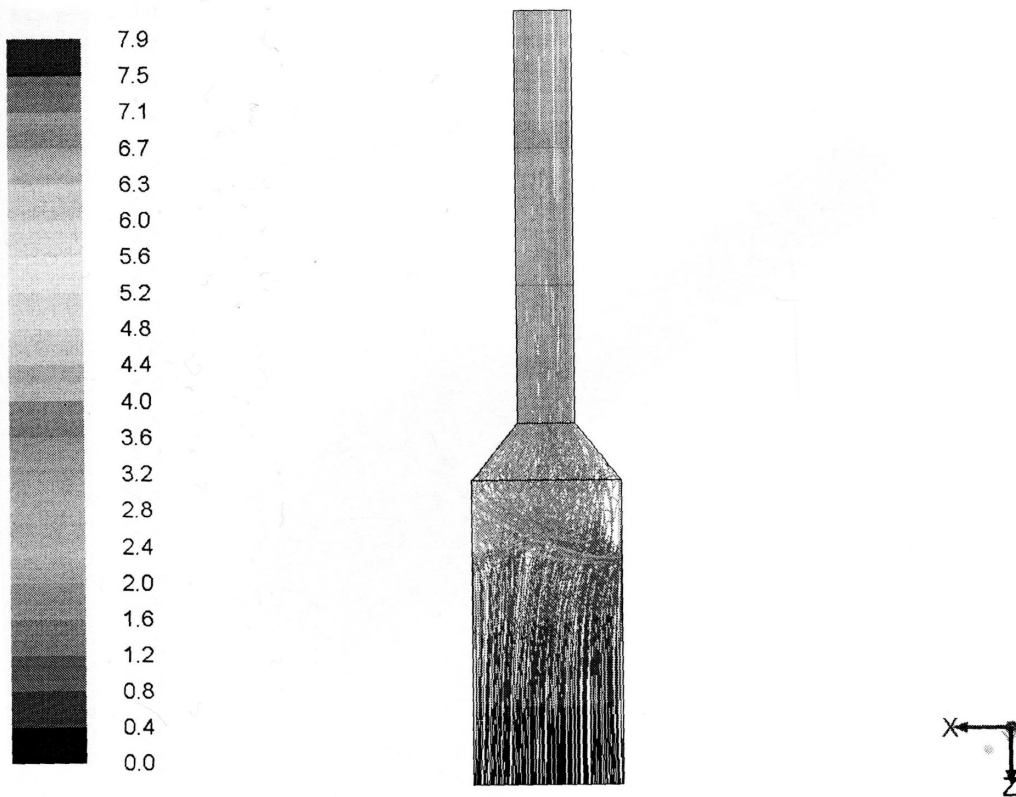


Рис. 6.16. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 1, вид снизу)

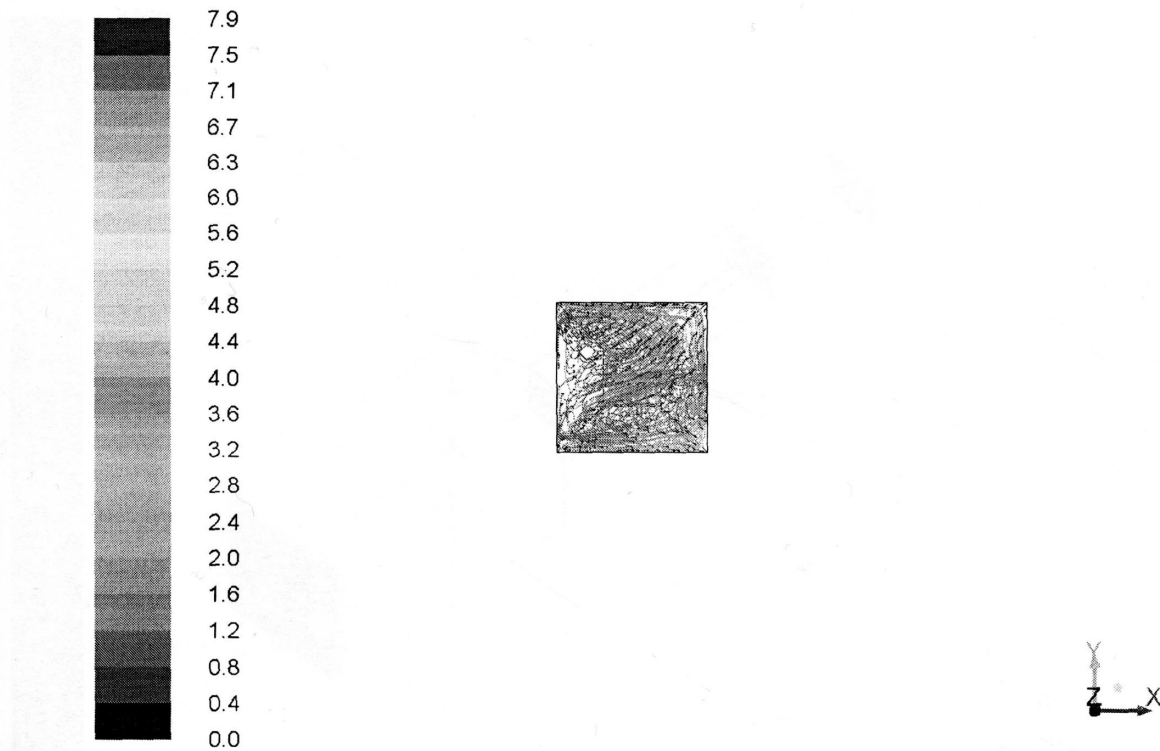


Рис. 6.17. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 1, вид спереди)

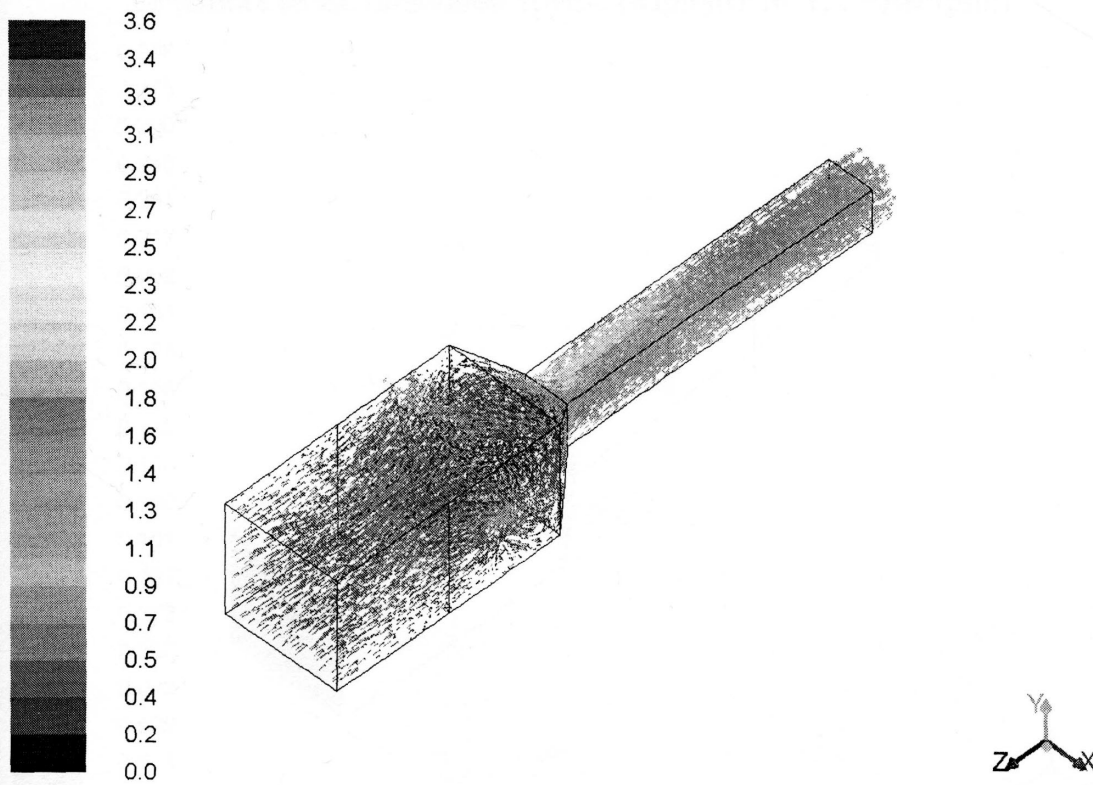


Рис. 6.18. Векторы скорости газа, окрашенные в соответствии с абсолютной скоростью газа, м/с (вариант № 1, изометрия)

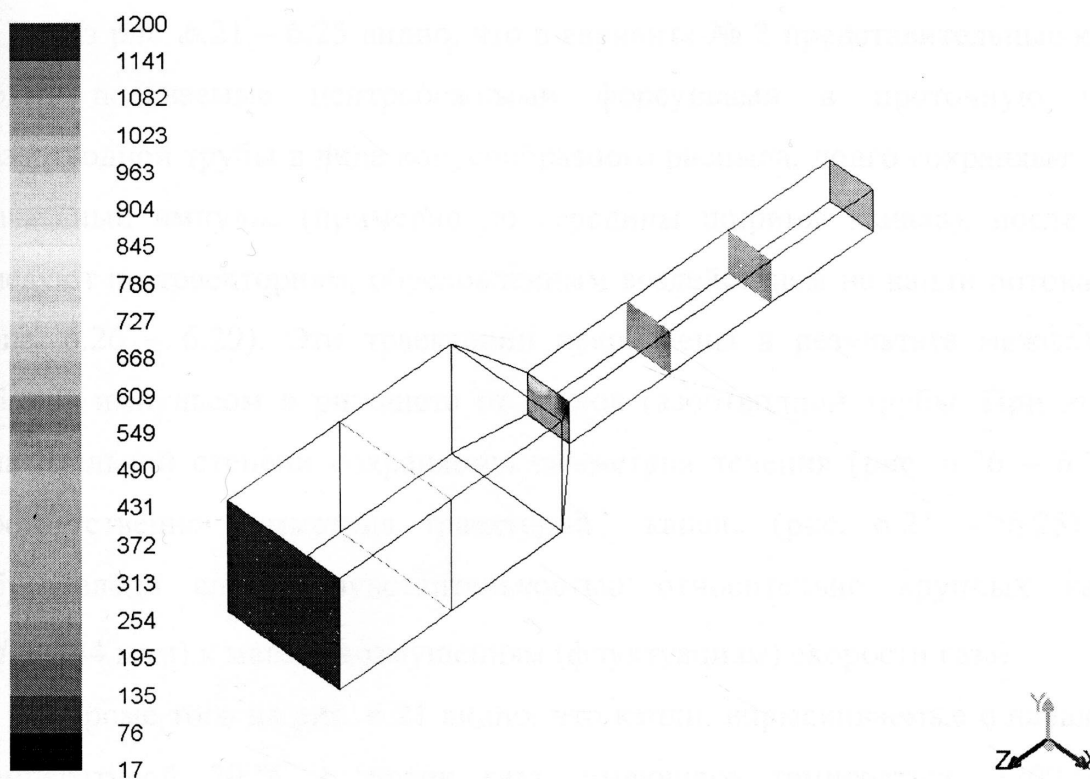


Рис. 6.19. Распределение температуры газа ($^{\circ}\text{C}$) в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы (вариант № 1, изометрия)

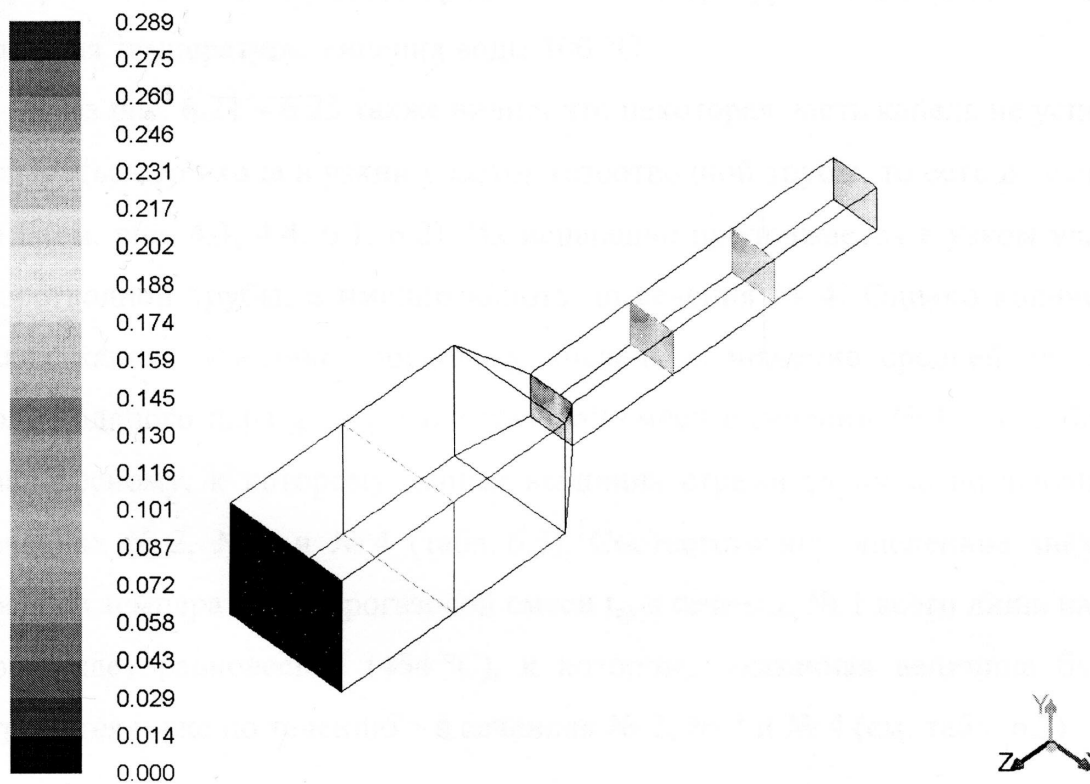


Рис. 6.20. Распределение массовой доли водяного пара в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы (вариант № 1, изометрия)

Из рис. 6.21 – 6.25 видно, что в варианте № 2 представительные капли воды, подаваемые центробежными форсунками в проточную часть газоотводной трубы в виде конусообразного распыла, долго сохраняют свой начальный импульс (примерно до середины ширины канала), после чего следуют по траекториям, обусловленным воздействием на капли потока газа (рис. 6.26 – 6.29). Эти траектории искривлены в результате межфазного обмена импульсом и рикошета от стенок газоотводной трубы. При этом в значительной степени сохраняется симметрия течения (рис. 6.26 – 6.30) и соответственно симметрия траекторий капель (рис. 6.21 – 6.25), что обусловлено слабой чувствительностью относительно крупных капель ($\bar{d} = 144$ мкм) к малым возмущениям (флуктуациям) скорости газа.

Кроме того из рис. 6.21 видно, что капли, впрыскиваемые с начальной температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в поток газа, имеющего температуру $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате процессов конвективного теплообмена и испарения при движении внутри газоотводной трубы принимают температуры от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $59\text{ }^{\circ}\text{C}$, не достигая температуры кипения воды $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из рис. 6.21 – 6.25 также видно, что некоторая часть капель не успевает испариться до входа в узкий участок газоотводной трубы, то есть до сечения № 1 (см. рис. 4.3, 4.4, 6.1, 6.2). Их испарение продолжается в узком участке газоотводной трубы, а именно вплоть до сечения № 4. Однако количество таких капель невелико, поскольку численное значение средней массовой доли водяного пара $g_{\text{H}_2\text{O},\text{cp}}$ в парогазовой смеси в сечении № 1 очень близко равновесному, к которому данная величина стремится ниже по течению в сечениях № 2, № 3 и № 4 (табл. 6.3). Соответственно численное значение средней температуры парогазовой смеси t_{cp} в сечении № 1 всего лишь на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышает равновесное ($454\text{ }^{\circ}\text{C}$), к которому указанная величина быстро стремится ниже по течению – в сечениях № 2, № 3 и № 4 (см. табл. 6.3).

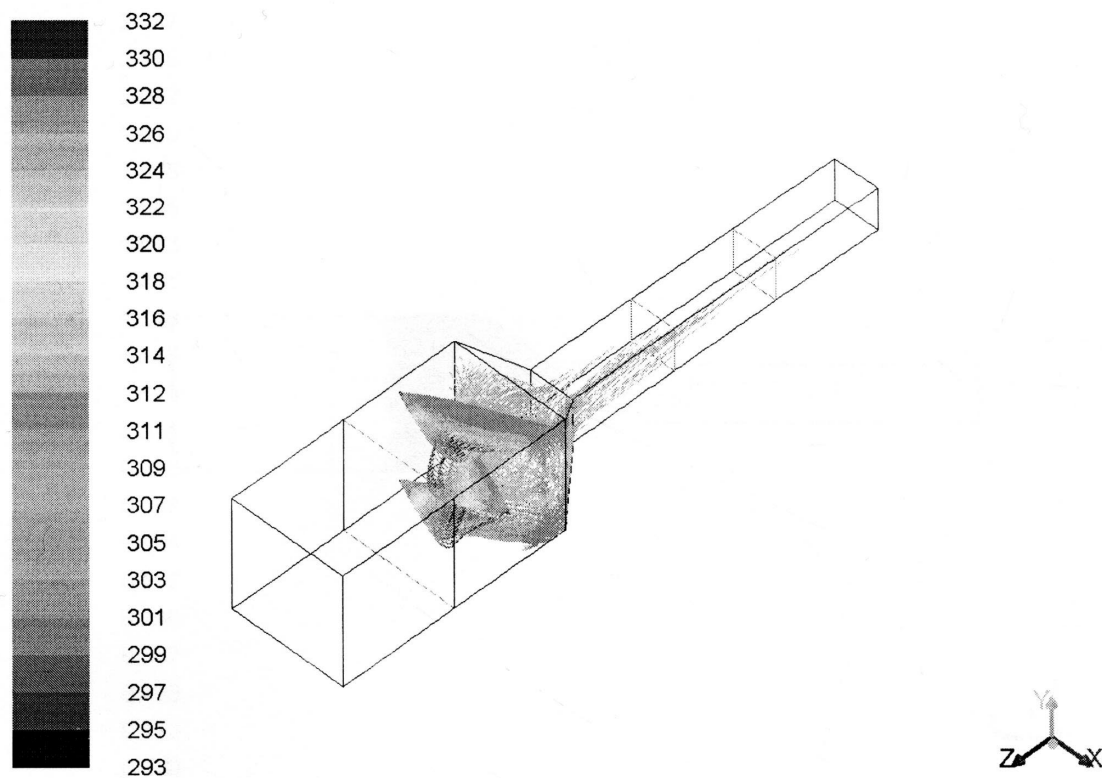


Рис. 6.21. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 2, изометрия)

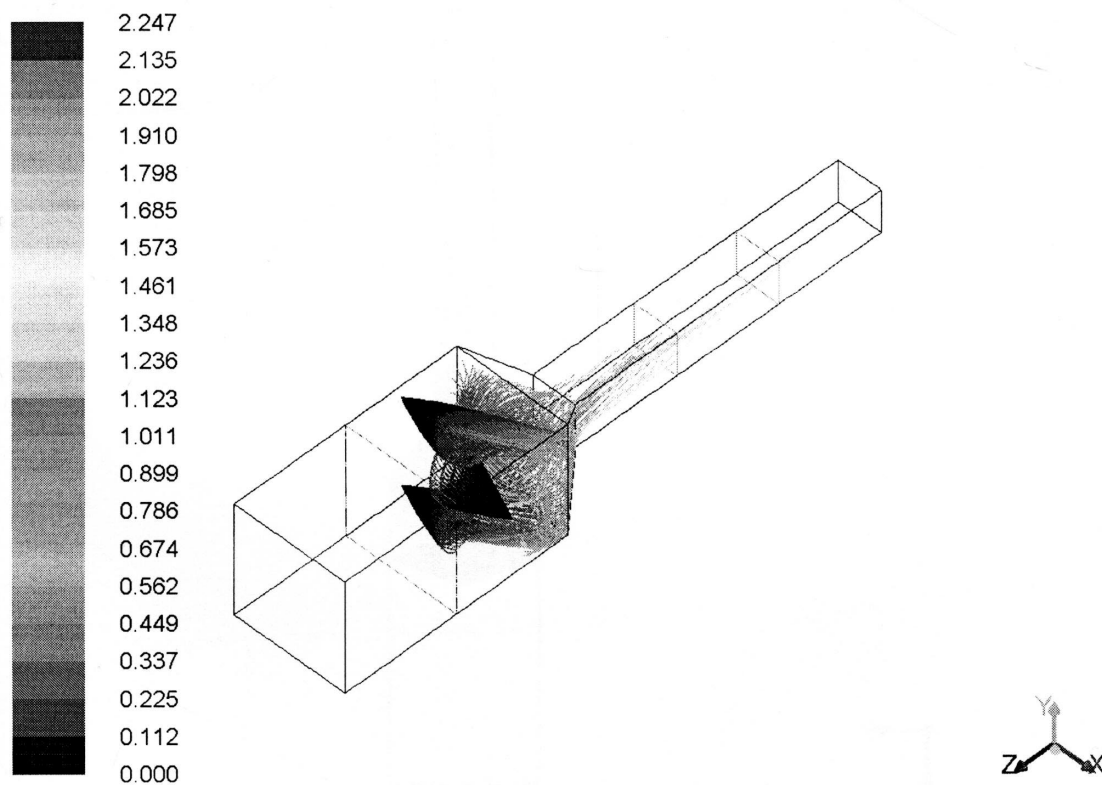


Рис. 6.22. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их температурой, К (вариант № 2, изометрия)

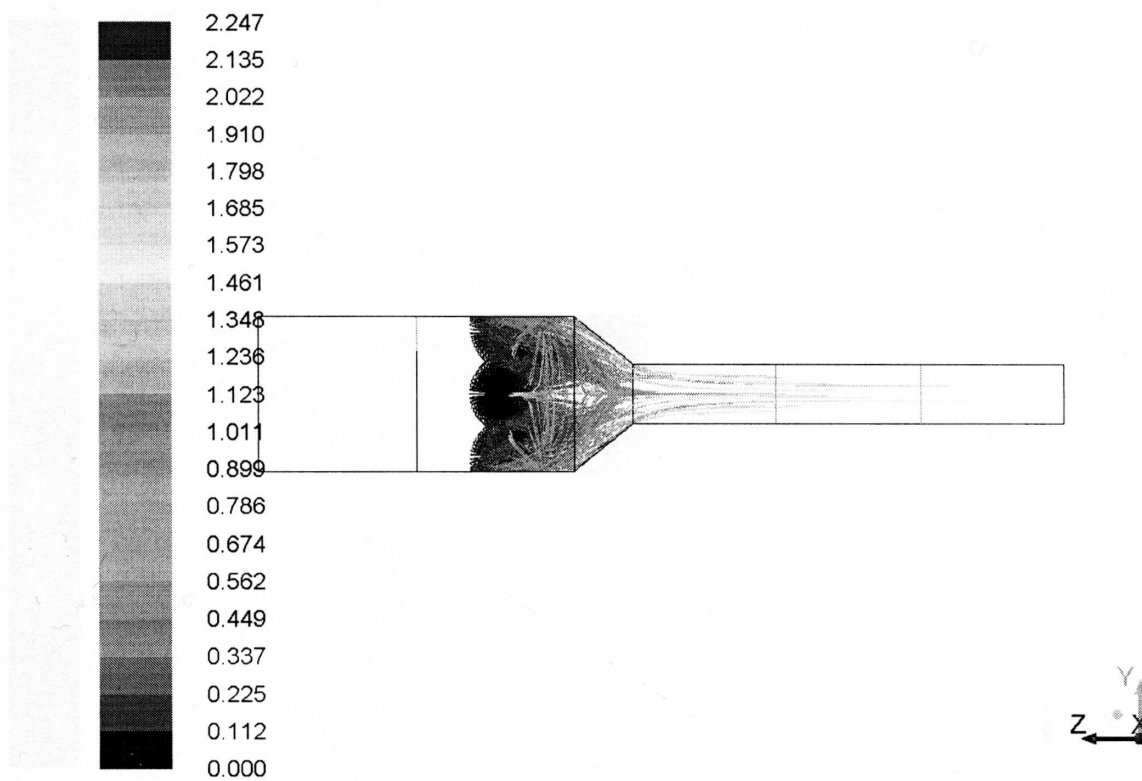


Рис. 6.23. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 2, вид справа)

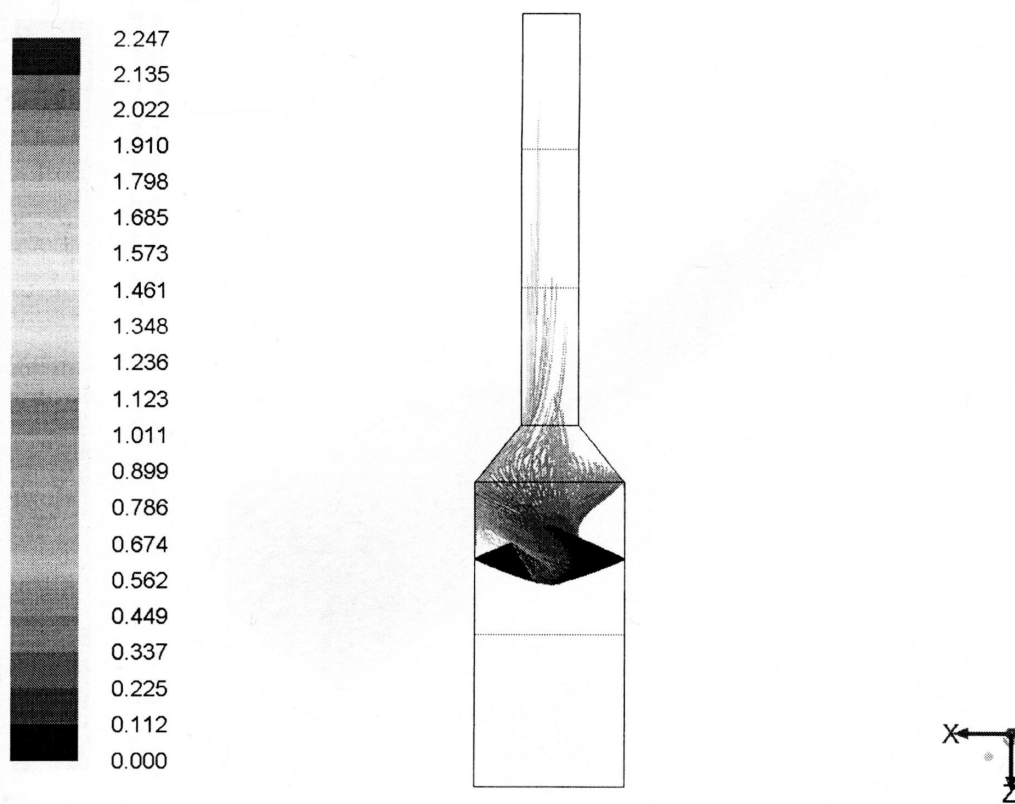


Рис. 6.24. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 2, вид снизу)

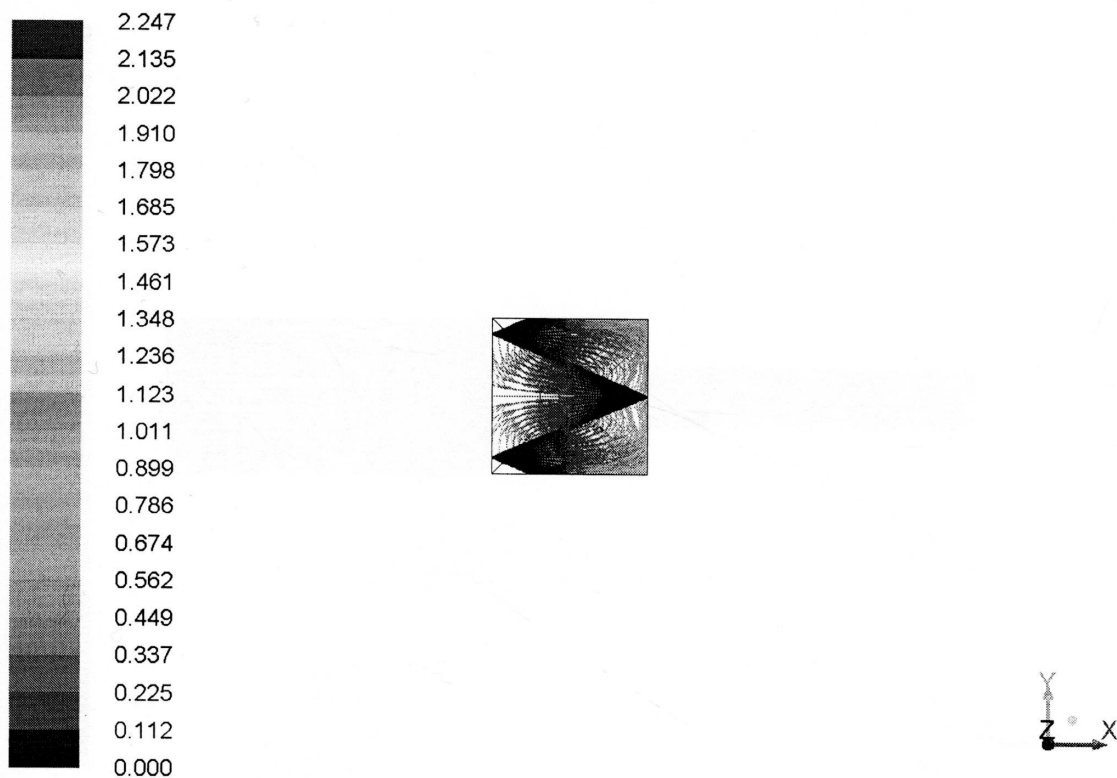


Рис. 6.25. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 2, вид спереди)

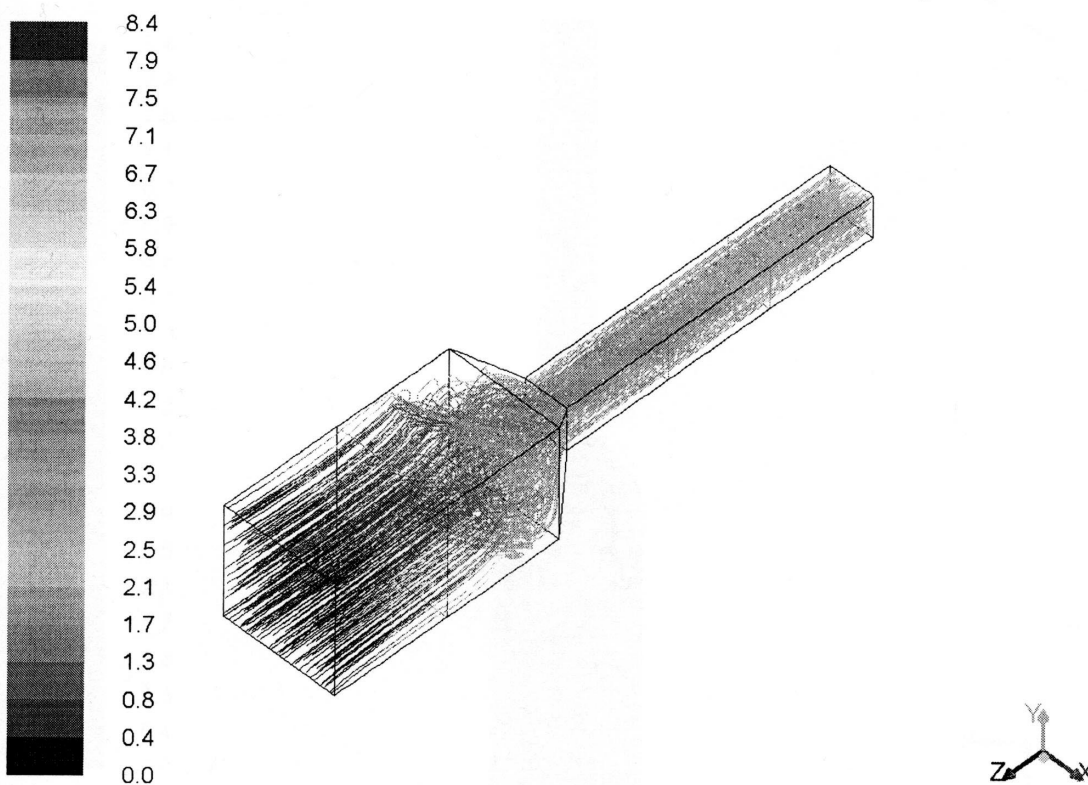


Рис. 6.26. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 2, изометрия)

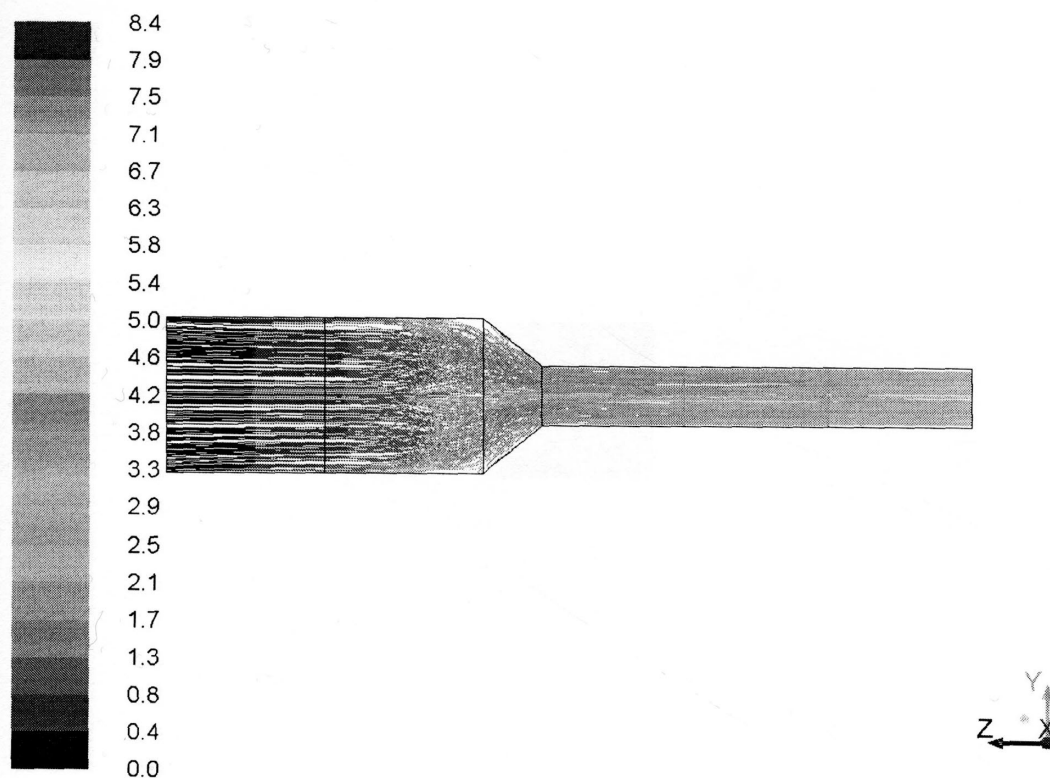


Рис. 6.27. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 2, вид справа)

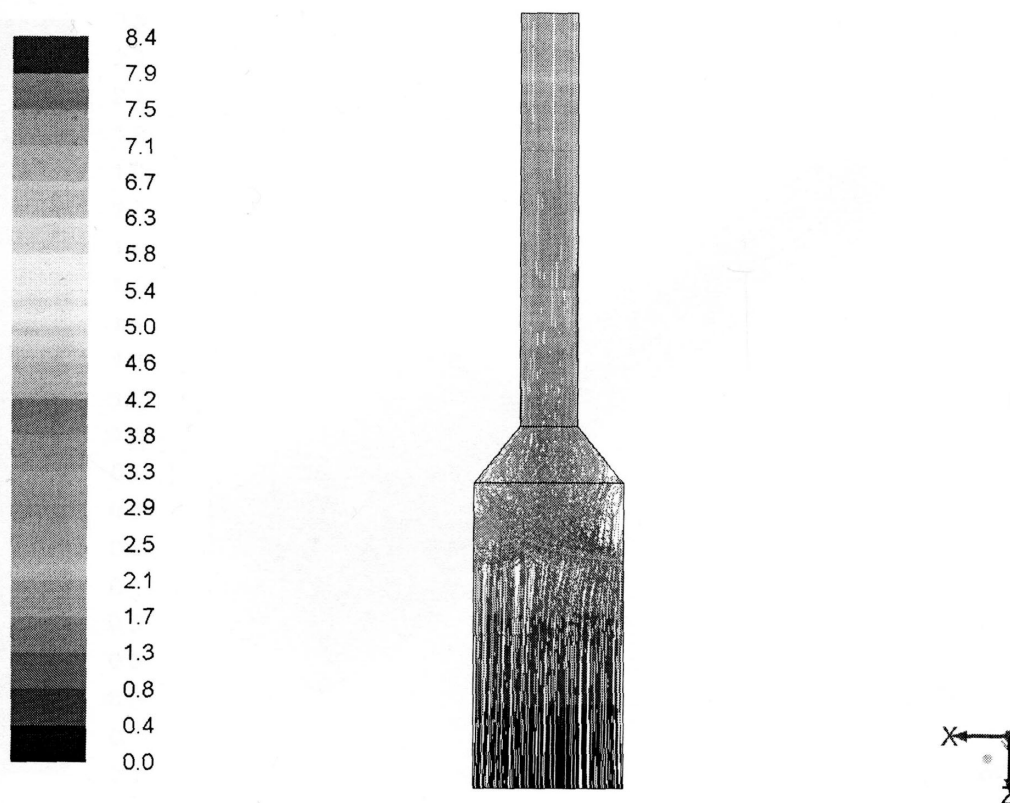


Рис. 6.28. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 2, вид снизу)



Рис. 6.29. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 2, вид спереди)

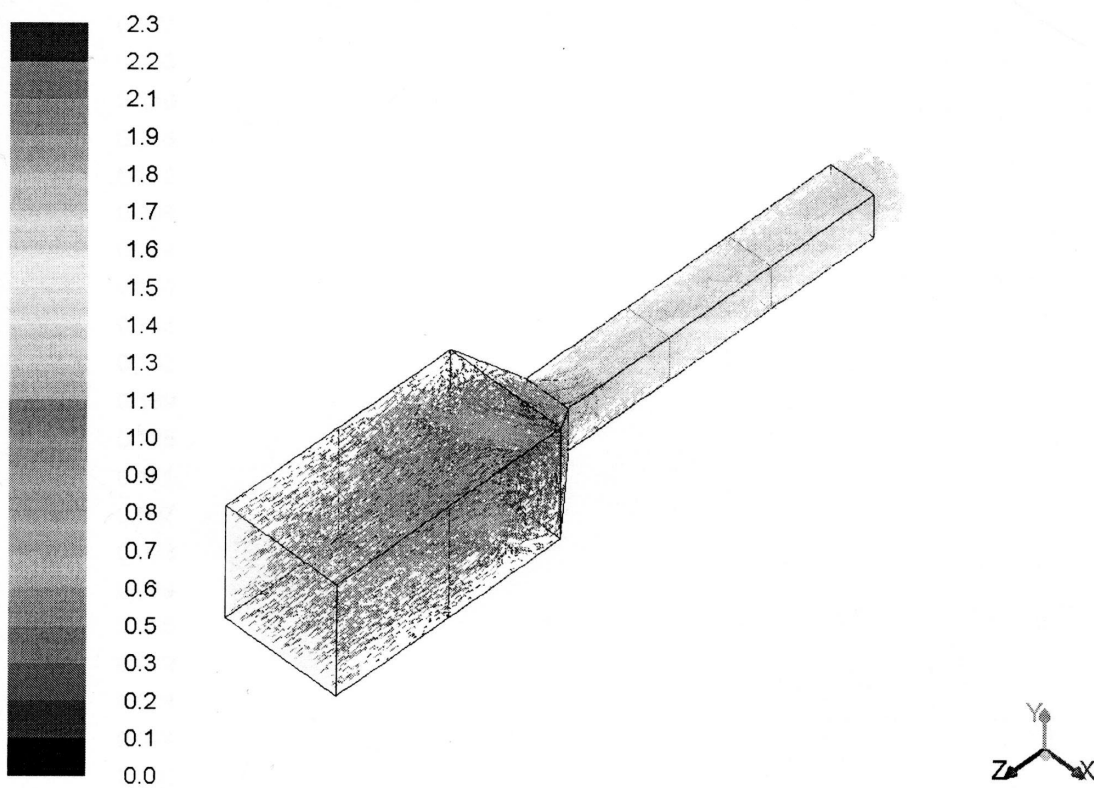


Рис. 6.30. Векторы скорости газа, окрашенные в соответствии с абсолютной скоростью газа, м/с (вариант № 2, изометрия)

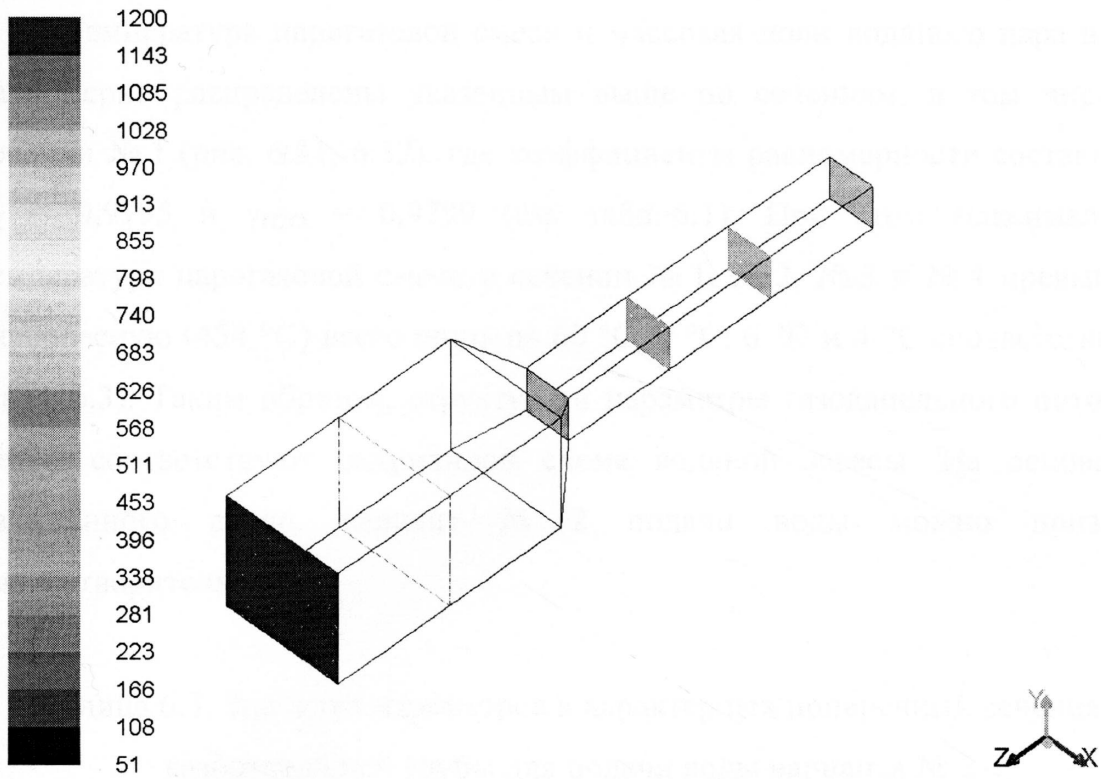


Рис. 6.31. Распределение температуры газа ($^{\circ}\text{C}$) в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы (вариант № 2, изометрия)

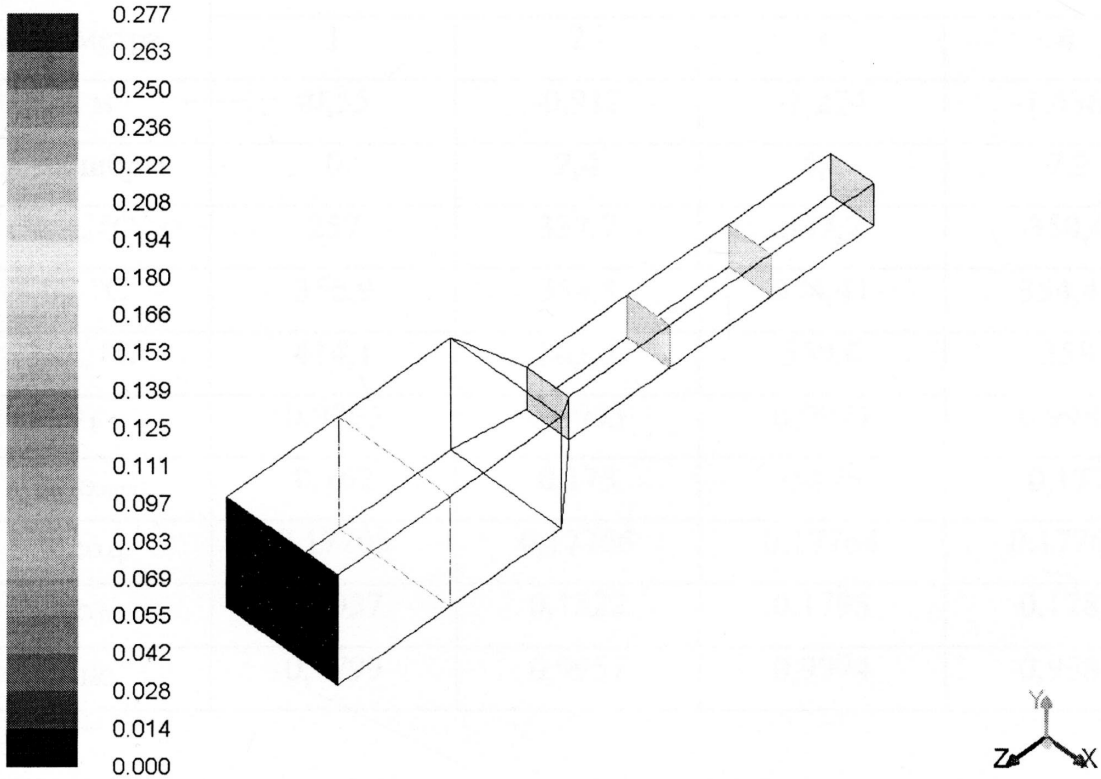


Рис. 6.32. Распределение массовой доли водяного пара в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы (вариант № 2, изометрия)

Температура парогазовой смеси и массовая доли водяного пара в ней равномерно распределены указанным выше по сечениям, в том числе в сечении № 1 (рис. 6.31, 6.32), где коэффициенты равномерности составляют $\gamma_T = 0,9795$ и $\gamma_{H_2O} = 0,9799$ (см. табл. 6.1). При этом максимальная температура парогазовой смеси в сечении № 1, № 2, № 3 и № 4 превышает равновесную (454 °С) всего лишь на 60 °С, 9 °С, 6 °С и 4 °С соответственно (табл. 6.3). Таким образом, структура и параметры газок капельного потока в целом соответствуют задуманной схеме водяной завесы. На основании изложенного выше, вариант № 2 подачи воды можно признать удовлетворительным.

Таблица 6.3. Значения параметров в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы для подачи воды варианта № 2

Наименование параметра	Номер сечения			
	1	2	3	4
z, м	-0,55	-0,912	-1,274	-1,6365
z, калибры	0	2,4	4,8	7,2
t_{min} , °С	257	337,7	347,7	350,4
t_{cp} , °С	356,9	354,3	354,41	354,42
t_{max} , °С	414,1	363,2	359,6	358
γ_T	0,9795	0,9955	0,9973	0,9983
$g_{H_2O.min}$	0,162	0,175	0,176	0,177
$g_{H_2O.cp}$	0,17705	0,17766	0,17764	0,17763
$g_{H_2O.max}$	0,2057	0,1822	0,1795	0,1787
γ_{H_2O}	0,9799	0,9957	0,9974	0,9984

Из рис. 6.33 – 6.37 видно, что в варианте № 3 представительные капли воды, подаваемые центробежными форсунками в проточную часть газоотводной трубы в виде конусообразного распыла, сохраняют свой

начальный импульс практически неизменным на всей ширине канала вплоть до столкновения с его стенками, после чего следуют по траекториям, обусловленным в основном явлением рикошета и лишь в очень незначительной степени воздействием на капли потока газа. Соответственно сохраняется симметрия траекторий капель, что обусловлено крайне низкой чувствительностью очень крупных капель ($\bar{d} = 514$ мкм) не только к малым возмущениям (флуктуациям), но и к осредненной скорости газа. В то же время капли оказывают сильное влияние на течение газа, которое при этом остается практически симметричным (рис. 6.38 – 6.42).

Кроме того из рис. 6.33 видно, что капли воды, впрыскиваемые с начальной температурой 20 °С в поток газа, имеющего температуру 1200 °С, в результате процессов конвективного теплообмена и испарения при движении внутри газоотводной трубы принимают температуры от 20 °С до 57 °С, не достигая температуры кипения воды 100 °С.

Из рис. 6.33 – 6.37 также видно, что капли не успевают испариться не только до входа в узкий участок газоотводной трубы, то есть до сечения № 1, но и вплоть до выхода из него, то есть до сечения № 4 (см. рис. 4.3, 4.4, 6.1, 6.2). Хотя капли лишь частично испаряются в пределах всей газоотводной трубы, то есть между ее входным сечением и сечением № 4, рикошетируя от стенок, они весьма плотно и довольно равномерно заполняют объем проточной части. В результате численное значение средней массовой доли водяного пара $g_{H_2O,cp}$ в парогазовой смеси в сечении № 1 оказывается незначительно меньше равновесного, к которому данная величина медленно стремится ниже по течению в сечениях № 2, № 3 и № 4 (табл. 6.4). Соответственно численное значение средней температуры парогазовой смеси t_{cp} в сечении № 1 оказывается на 64 °С больше равновесного (455 °С), к которому указанная величина стремится ниже по течению – в сечениях № 2, № 3 и № 4 (см. табл. 6.4).

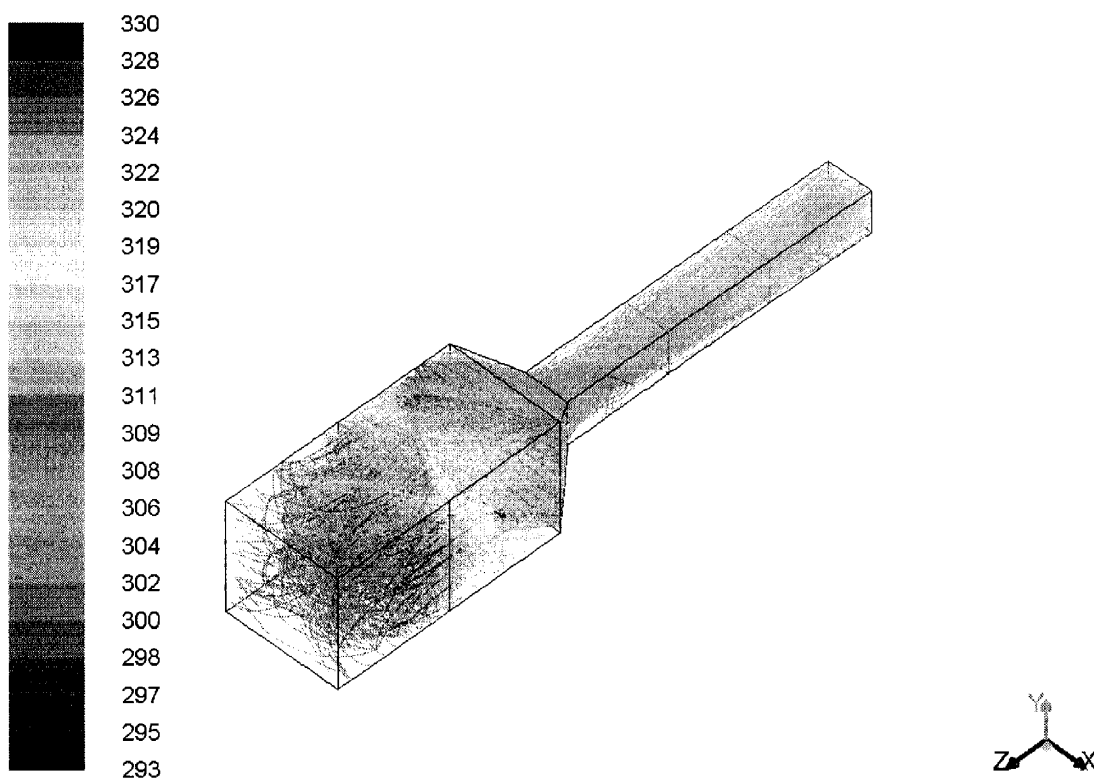


Рис. 6.33. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 3, изометрия)

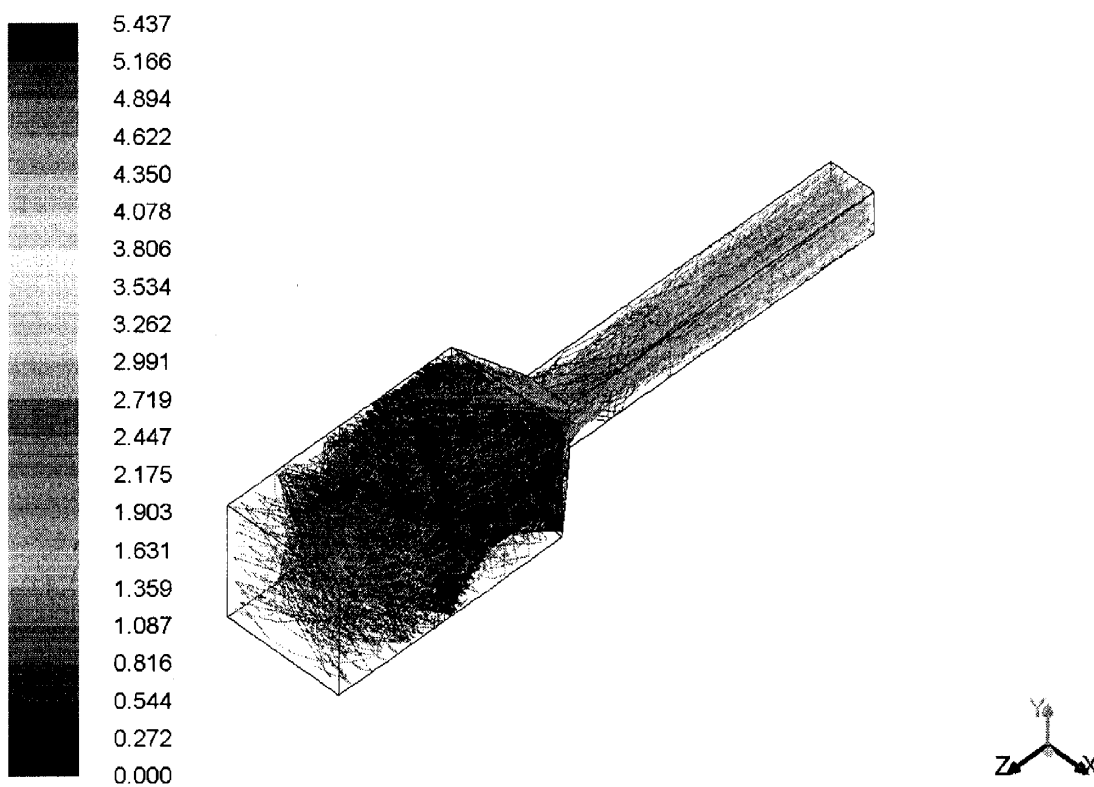


Рис. 6.34. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 3, изометрия)

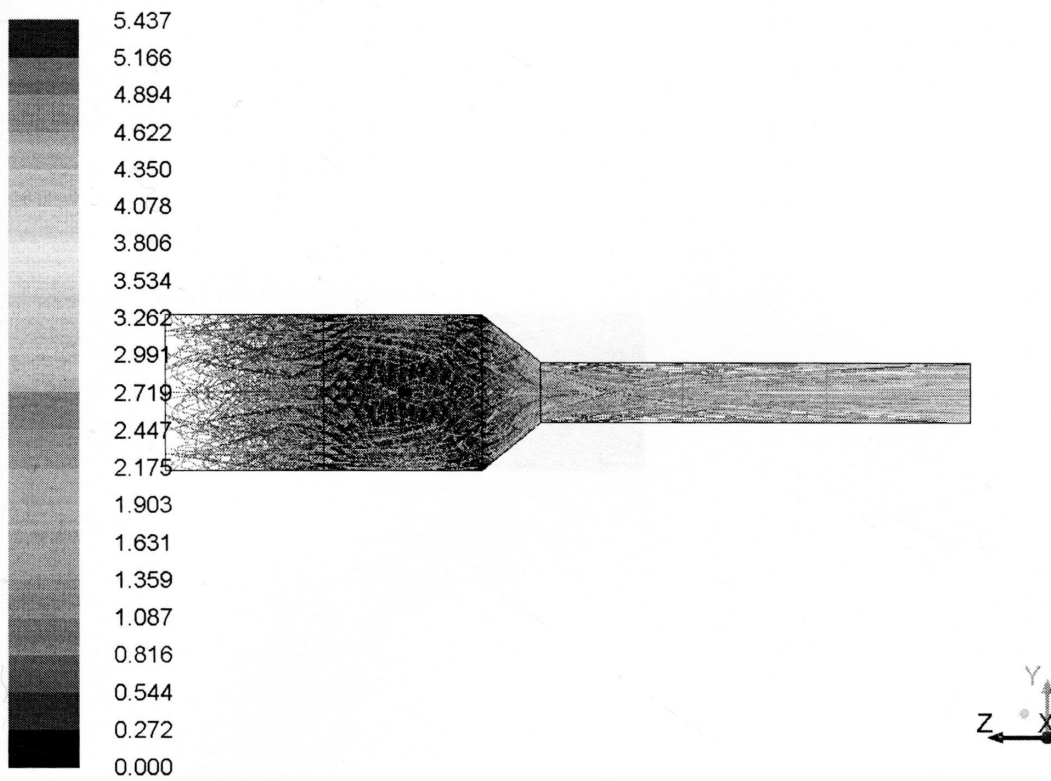


Рис. 6.35. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 3, вид справа)

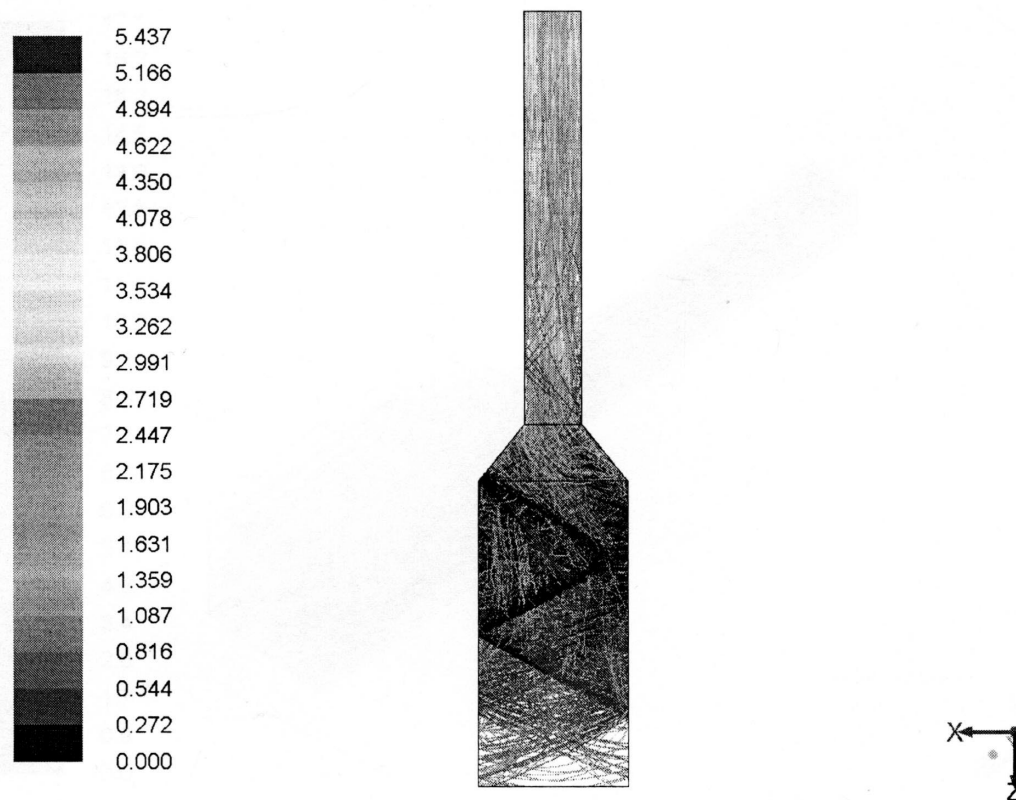


Рис. 6.36. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 3, вид снизу)

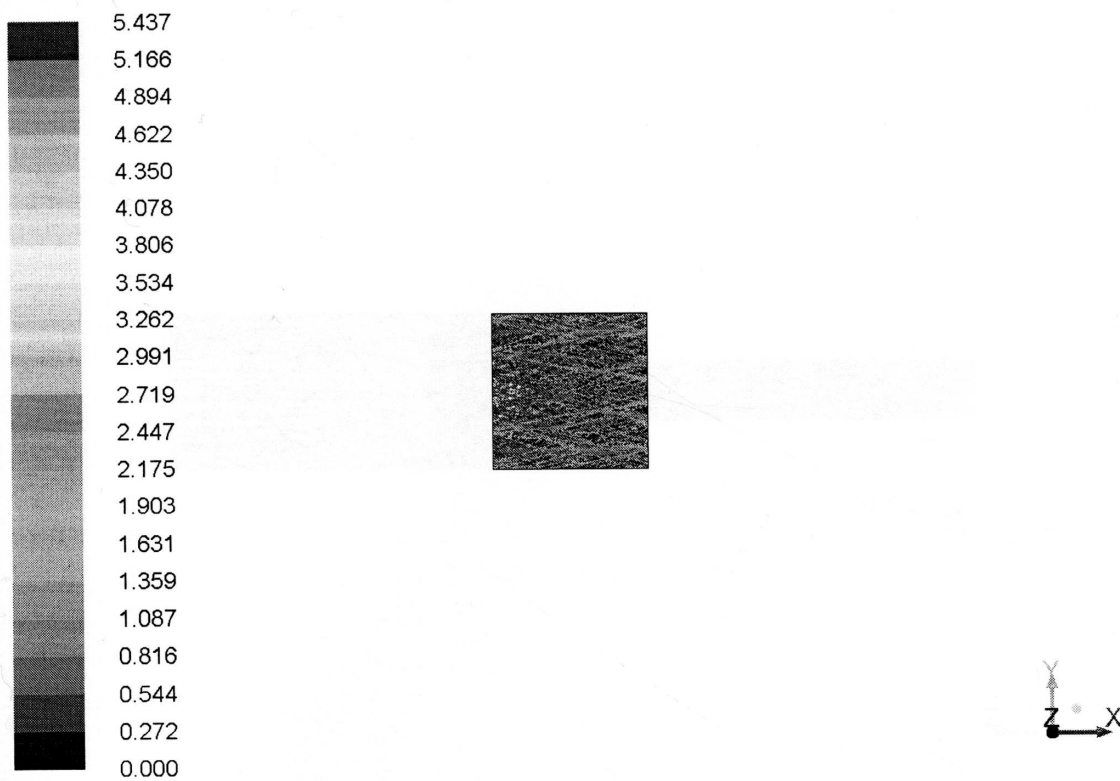


Рис. 6.37. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с временем их пребывания, с (вариант № 3, вид спереди)

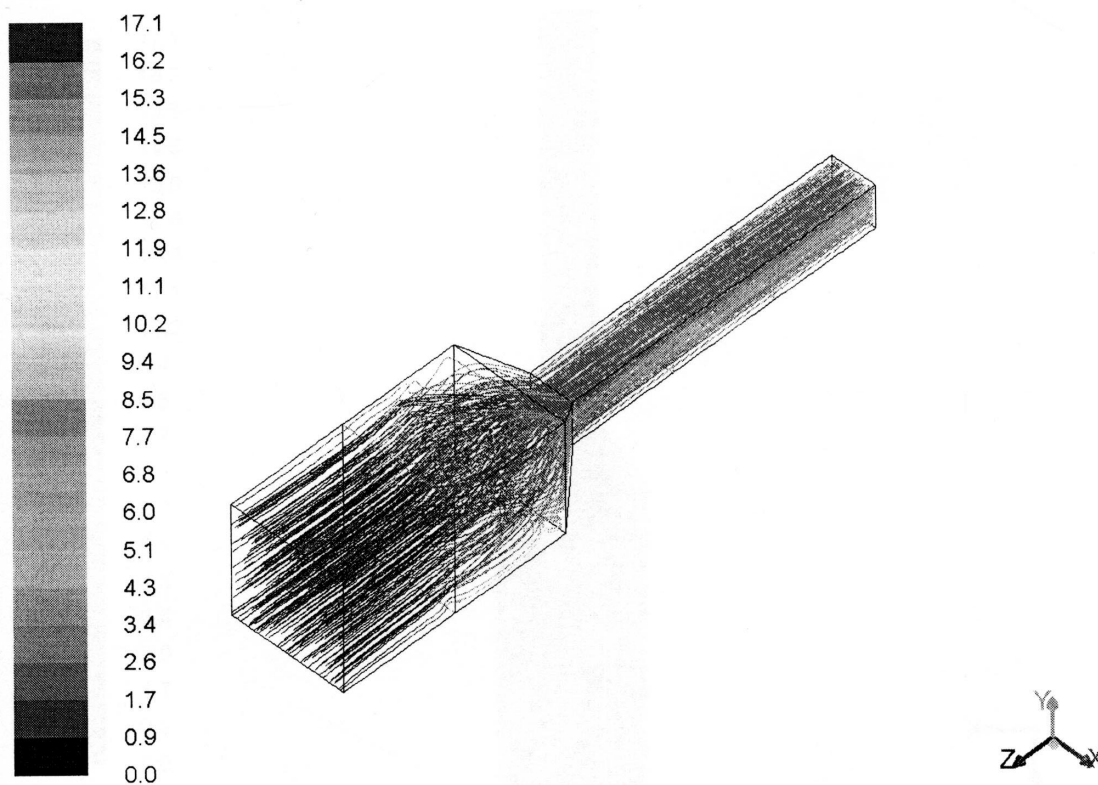


Рис. 6.38. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 3, изометрия)

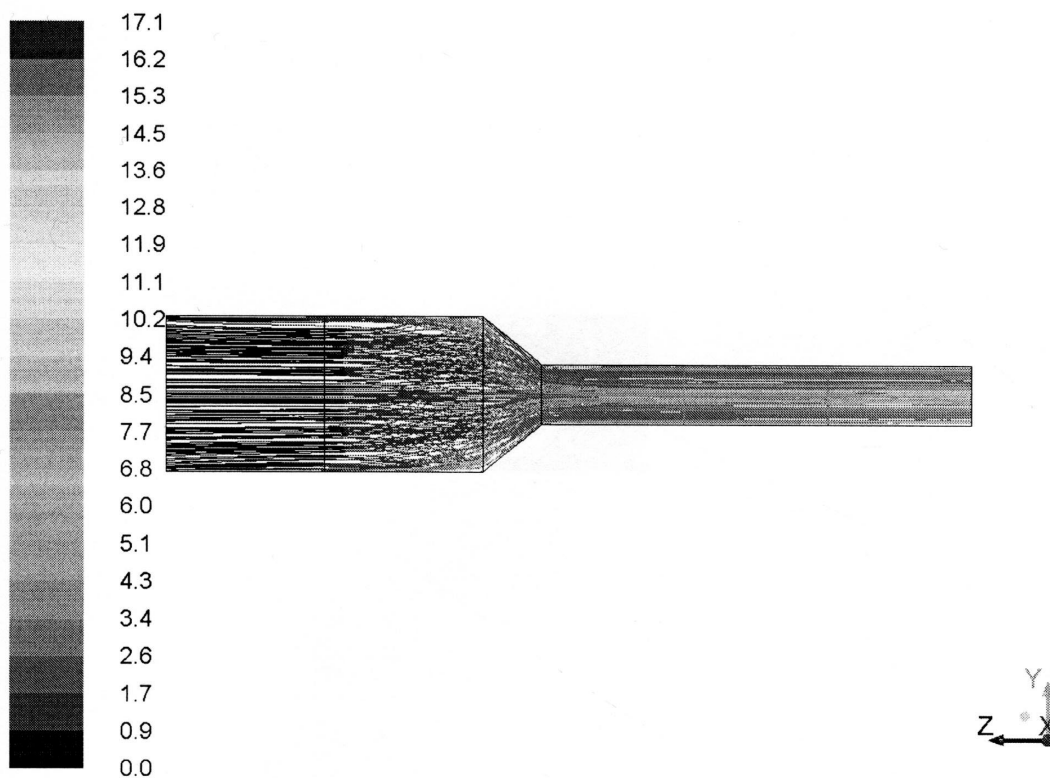


Рис. 6.39. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 3, вид справа)



Рис. 6.40. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 3, вид снизу)



Рис. 6.41. Линии тока газа, окрашенные в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 3, вид спереди)

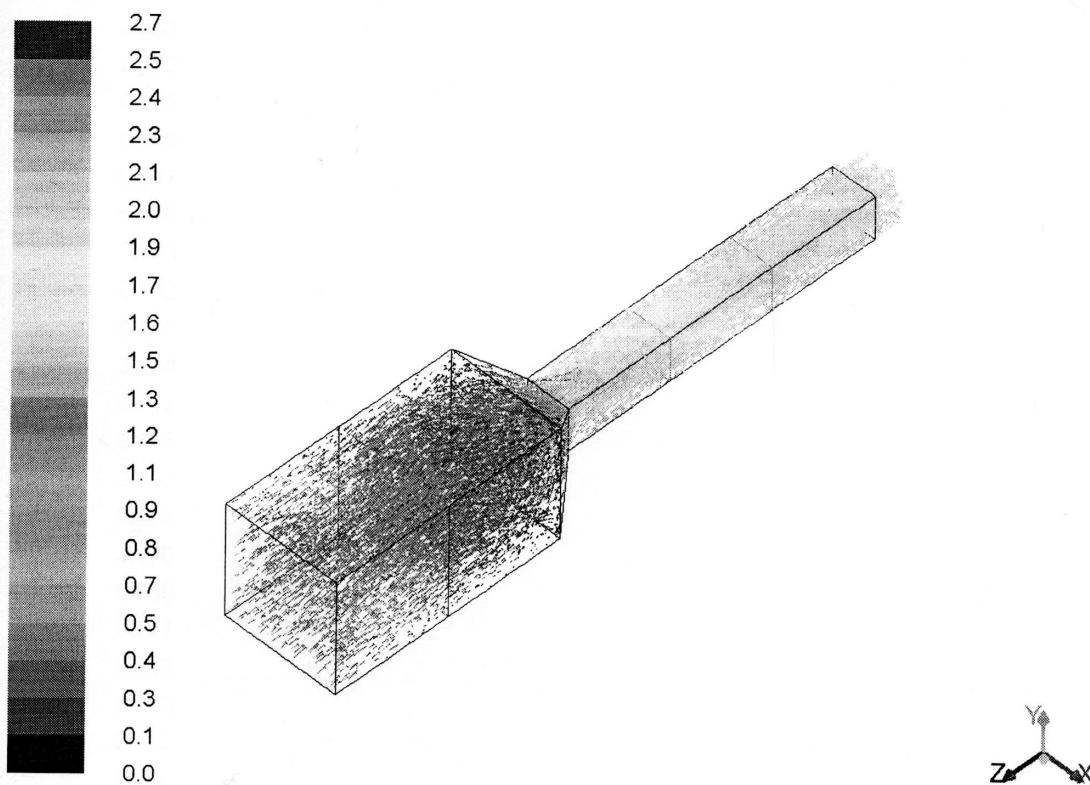


Рис. 6.42. Векторы скорости газа, окрашенные в соответствии с абсолютной скоростью газа, м/с (вариант № 3, изометрия)

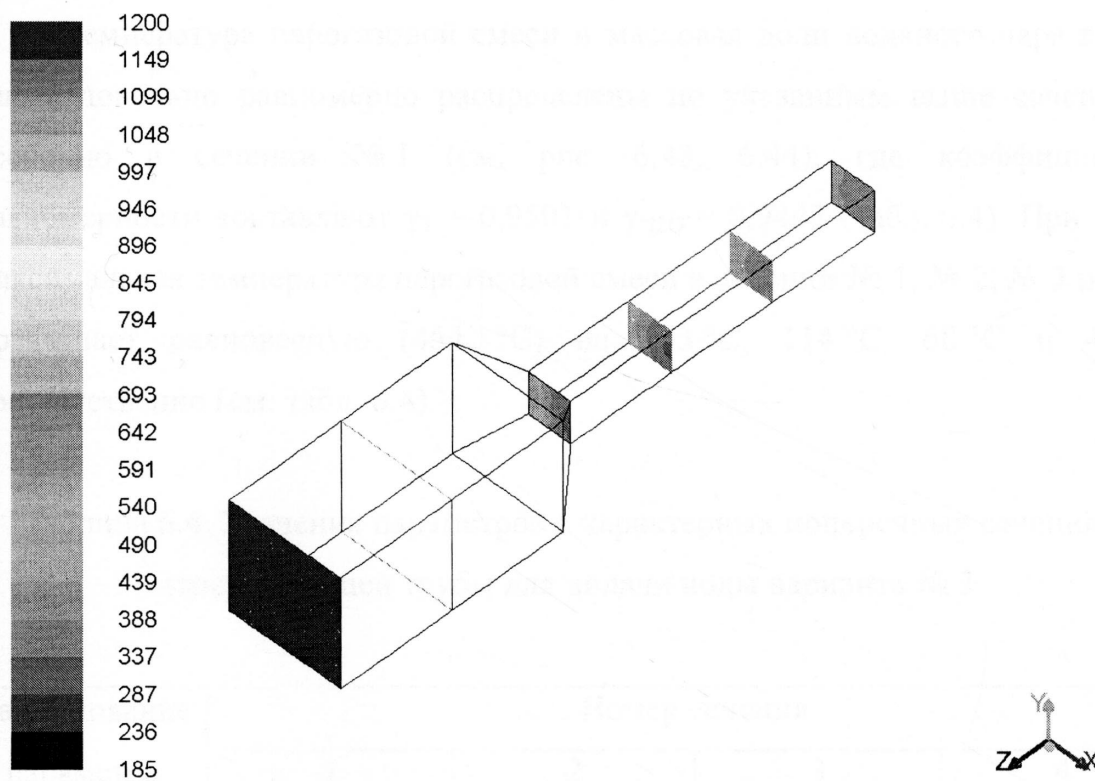


Рис. 6.43. Распределение температуры газа ($^{\circ}\text{C}$) в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы (вариант № 3, изометрия)

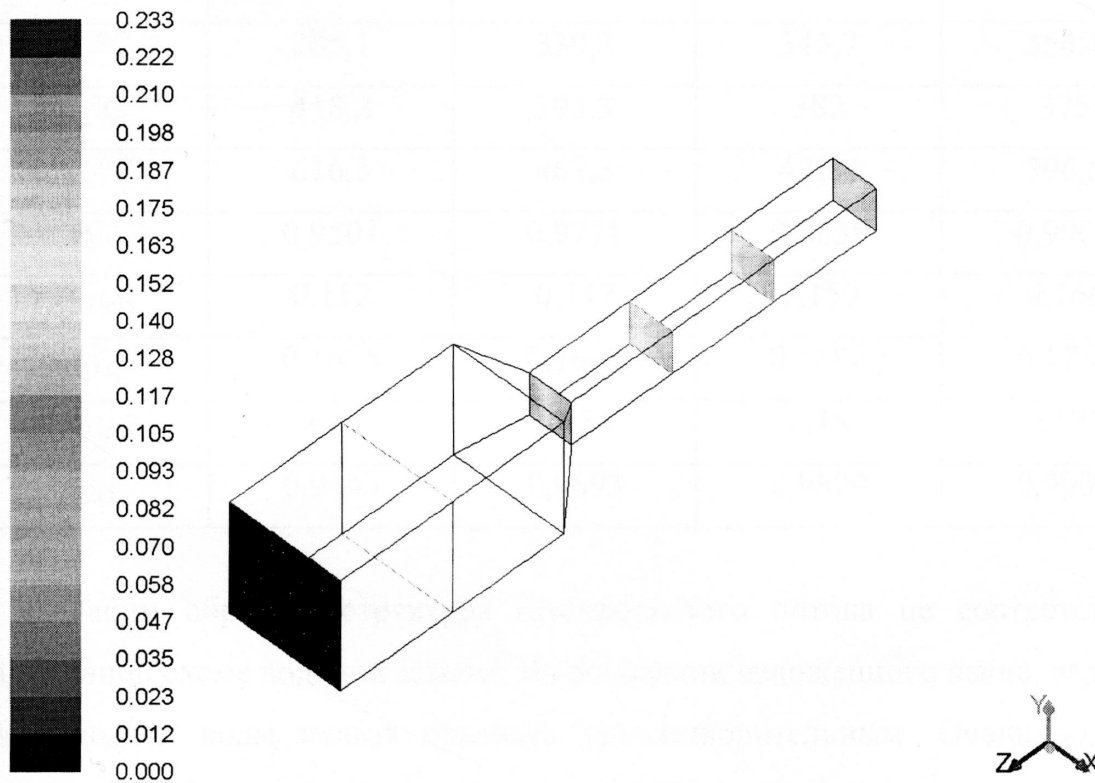


Рис. 6.44. Распределение массовой доли водяного пара в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы (вариант № 3, изометрия)

Температура парогазовой смеси и массовая доли водяного пара в ней также довольно равномерно распределены по указанным выше сечениям, особенно в сечении № 1 (см. рис. 6.43, 6.44), где коэффициенты равномерности составляют $\gamma_T = 0,9501$ и $\gamma_{H_2O} = 0,9443$ (табл. 6.4). При этом максимальная температура парогазовой смеси в сечении № 1, № 2, № 3 и № 4 превышает равновесную (454 °С) на 263 °С, 114 °С, 68 °С и 43 °С соответственно (см. табл. 6.4).

Таблица 6.4. Значения параметров в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы для подачи воды варианта № 3

Наименование параметра	Номер сечения			
	1	2	3	4
z, м	-0,55	-0,912	-1,274	-1,6365
z, калибры	0	2,4	4,8	7,2
$t_{min}, ^\circ\text{C}$	285,1	330,2	345,7	354,1
$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	418,2	393,3	382	375
$t_{max}, ^\circ\text{C}$	616,5	467,5	422,4	396,6
γ_T	0,9501	0,9711	0,9835	0,9904
$g_{H_2O.min}$	0,112	0,147	0,159	0,166
$g_{H_2O.cp}$	0,1604	0,1668	0,1698	0,1718
$g_{H_2O.max}$	0,2	0,184	0,18	0,177
γ_{H_2O}	0,9443	0,9693	0,9829	0,9903

Таким образом, структура газокпельного потока не соответствует задуманной схеме водяной завесы. На основании изложенного выше, вариант № 3 подачи воды нельзя признать удовлетворительным. Очевидно, что признание варианта № 2 подачи воды удовлетворительным не исключает существование еще более совершенного варианта, для поиска которого в

дальнейшем можно сформулировать и решить соответствующую задачу оптимизации.

6.2. Численный эксперимент по определению времени охлаждения генераторного газа до безопасной температуры

Пусть элементарный объем генераторного газа в начальный момент времени расположен в центре поперечного сечения проточной части теплообменника, предшествующего зоне впрыска воды (сечение «В – В» в вариантах № 1 и № 2; сечение «А – А» в варианте № 3).

Рассмотрим движение элементарного объема газа в проточной части теплообменника, построив соответствующую контрольную струйку тока (рис. 6.45).

Построим график зависимость координаты Z элементарного объема газа от времени τ (рис. 6.46). Определим из графика $Z(\tau)$ моменты времени t_i , в которые элементарный объем газа пересекает контрольные сечения i .

Определим среднюю t_{cp} , минимальную t_{min} , и максимальную t_{max} температуры газа, среднее квадратическое отклонение температуры и коэффициент равномерности распределения температуры газа в контрольных сечениях i . Вычислим время пребывания Δt , охлаждение Δt и среднюю скорость охлаждения $\Delta t/\Delta \tau$ элементарного объема газа между соседними сечениями i и $(i - 1)$. Полученные данные сведем в таблицу 1.

Построим график зависимость температуры газа ($^{\circ}\text{C}$) от времени (c) (рис. 6.47) и гисторамму средней скорости охлаждения газа ($^{\circ}\text{C}/\text{c}$) на участках, расположенных между контрольными сечениями i и $(i - 1)$ (рис. 6.48) и гисторамму времени пребывания газа (c) на участках, расположенных между контрольными сечениями (рис. 6.49).

Из табл. 6.5 и рис. 6.47 – 6.49 видно следующее.

Полное время пребывания элементарного объема газа в проточной части газоотводной трубы для вариантов № 1, 2 и 3 составляет 1,32, 6,42 и 2,37 с соответственно (см. табл. 6.5).

Максимальное охлаждение газа происходит во время его контакта с испаряющимися каплями впрыскиваемой воды (см. рис. 6.47):

– для варианта № 1 температура газа снижается до 472 °С за 0,47 с его пребывания между сечениями В и Д;

– для варианта № 2 температура газа снижается до 436 °С за 1 с его пребывания между сечениями В и Д;

– для варианта № 3 температура газа снижается до 454 °С за 1,6 с его пребывания между сечениями А и Д.

Максимальная скорость охлаждения во всех трех вариантах имеет место между сечениями В и Г (см. рис. 6.48), достигая в вариантах № 1, 2 и 3 значений -1919, -1269 и -975 с соответственно. Остальную часть времени занимает перемешивание газа с водяным паром.

Наилучшее качество смешения имеет место в варианте № 2 (коэффициент равномерности 0,997) благодаря большому времени пребывания газа между сечениями Г и Д (см. рис. 6.74) вследствие наличия там циркуляционного течения (см. рис. 6.45).

Однако, с точки зрения обеспечения экологической безопасности, наиболее рациональным оказался режим, который обеспечивает снижение температуры газового потока с 1200 до 305,8 °С в течение 1,32 с, при этом расход воды составляет 0,0036 кг/с (12,7 л/ч.) при охлаждении 30 м³/ч газа.

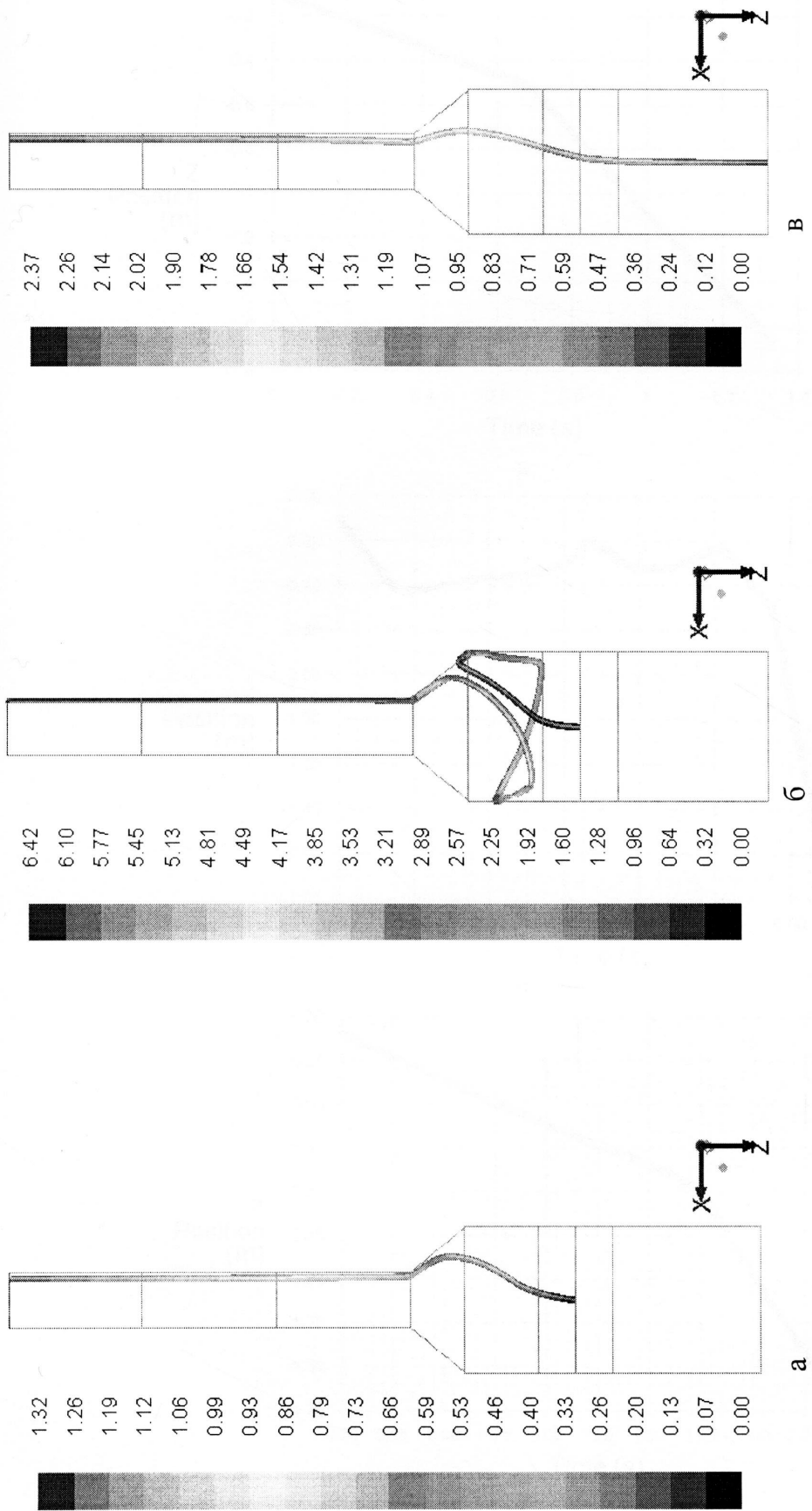
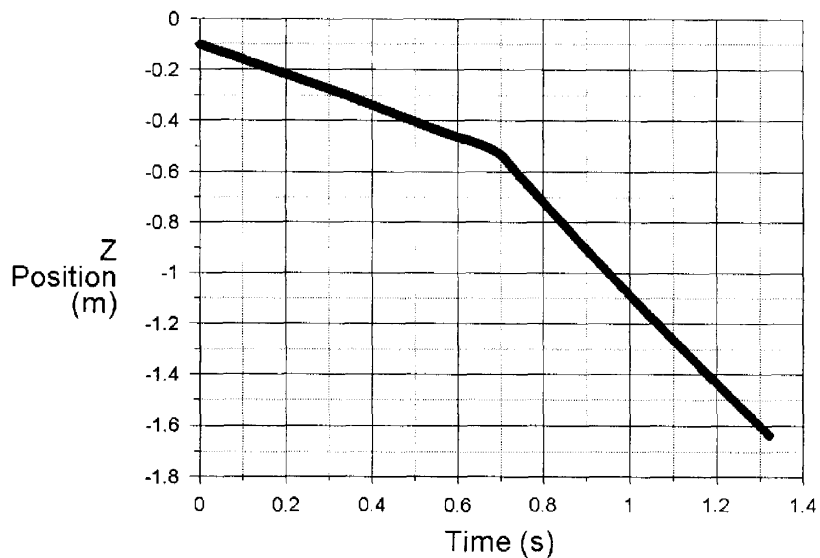
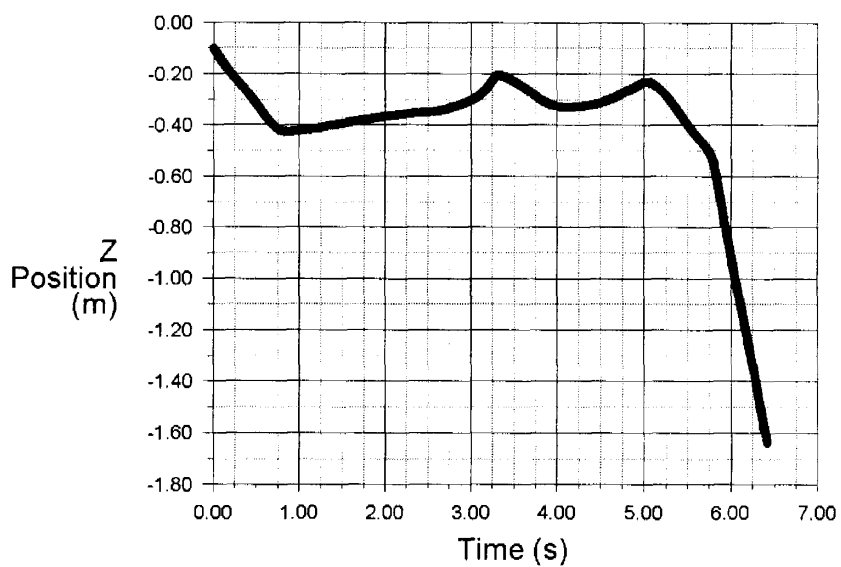


Рис. 6.45. Траектория движения элементарного объема газа (контрольная струйка тока):

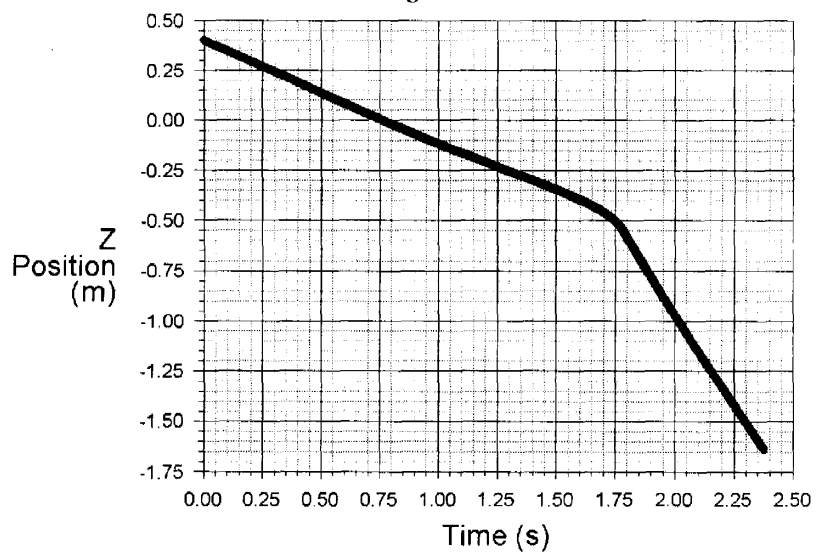
а – вариант № 1; б – вариант № 2; в – вариант № 3



a



б



в

Рис. 6.46. Зависимость координаты Z элементарного объема газа от времени:

а – вариант № 1; б – вариант № 2; в – вариант № 3

Таблица 6.5. Результаты времени пребывания элементарного объема газа в проточной части газоотводной трубы

Параметр	Сечение								
	A	Б	В	Г	Д	1	2	3	4
$z, \text{ м}$	0,4	0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,55	-0,912	-1,274	-1,6365
Вариант № 1									
$\tau, \text{ с}$			0	0,17	0,48	0,72	0,9	1,1	1,32
$t_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$	1200	1199,8	1180,4	854,2	472,2	408,6	364,7	357,6	305,8
$\Delta\tau, \text{ с}$			0,17	0,31	0,24	0,18	0,2	0,2	0,22
$\Delta t_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$		-0,2	-19,4	-326,2	-382	-63,6	-43,9	-7,1	-1,8
$\Delta t_{\text{ср}}/\Delta\tau, \text{ }^\circ\text{C/с}$				-	-795,8	-265	-243,9	-35,5	-8,2
$t_{\text{max}}, \text{ }^\circ\text{C}$	1200	1200	1200	1200	1182,1	954,7	593,6	481,6	423,9
$t_{\text{min}}, \text{ }^\circ\text{C}$	1200	1119,0	295,7	55,0	17,2	33,1	190,2	276,3	311,8
$t_{\text{max}} - t_{\text{min}}, \text{ }^\circ\text{C}$	0	1,0	904,3	1145	1164,9	921,6	403,4	205,3	112,1
$t_{\text{max}} - t_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$	0	0,2	19,6	345,8	709,9	546,1	228,9	124	68,1
$\text{CKO}_T, \text{ }^\circ\text{C}$	0	4,2	111,3	394,3	342,7	228,7	97,9	53,2	32,4
γ_T	1	0,9999	0,9847	0,7919	0,7282	0,8152	0,8989	0,9382	0,9611

Таблица 6.5. Окончание

Вариант № 2										
τ, c			0	0,25	1	5,8	6,0	6,2	6,4	
$t_{cp}, ^\circ C$	1200	1200	1200	882,8	436,0	356,9	354,4	354,4	354,4	
$\Delta\tau, c$			0,25	0,75	4,8	0,2	0,2	0,2	0,2	
$\Delta t_{cp}, ^\circ C$		-0,2	-317,2	447	-79,1	-2,5	0	0	0	
$\Delta t_{cp}/\Delta\tau, ^\circ C/c$			-1268,8	-596	-16,5	-12,5	0	0	0	
$t_{max}, ^\circ C$	1200	1200	1200	1200	791,8	416,9	363,1	359,6	358,0	
$t_{min}, ^\circ C$	1200	1200	1199,9	122,0	53,5	253,9	337,9	337,9	350,4	
$t_{max} - t_{min}, ^\circ C$	0	0	0,1	1078	738,3	163	25,2	21,7	7,6	
$t_{max} - t_{cp}, ^\circ C$	0	0	0	317,2	355,8	60	8,7	5,2	3,6	
$CKO_T, ^\circ C$	0	0,0002	0,016	375,1	175,4	38,6	6,7	3,8	2,4	
γ_T	1	1	1	0,813	0,839	0,964	0,992	0,995	0,997	
Вариант № 3										
τ, c			0,95	1,15	1,6	1,76	1,96	2,16	2,36	
$t_{cp}, ^\circ C$	1200	1053,7	891,8	696,8	454,0	418,2	393,3	382,0	375,0	
$\Delta\tau, c$		0,75	0,2	0,2	0,45	0,15	0,2	0,2	0,2	
$\Delta t_{cp}, ^\circ C$		-146,3	-161,9	-195	-242,8	-35,8	-24,9	-11,3	-7	
$\Delta t_{cp}/\Delta\tau, ^\circ C/c$		-195,1	-809,5	-975	-539,6	238,7	-124,5	-56,5	-35	
$t_{max}, ^\circ C$	1200	1138,7	1001,5	876,5	798,4	617,8	468,1	422,1	396,6	
$t_{min}, ^\circ C$	1198,5	535,6	594,0	435,0	194,7	284,9	330,8	345,8	354,1	
$t_{max} - t_{min}, ^\circ C$	1,5	603,1	407,5	441,5	603,7	332,9	137,3	76,3	42,5	
$t_{max} - t_{cp}, ^\circ C$	0	85	109,7	179,7	344,4	199,6	74,8	40,1	21,7	
$CKO_T, ^\circ C$	0	71,5	76,6	97,9	142,6	94,0	44,0	24,7	14,0	
γ_T	1	0,985	0,970	0,947	0,885	0,917	0,951	0,972	0,984	

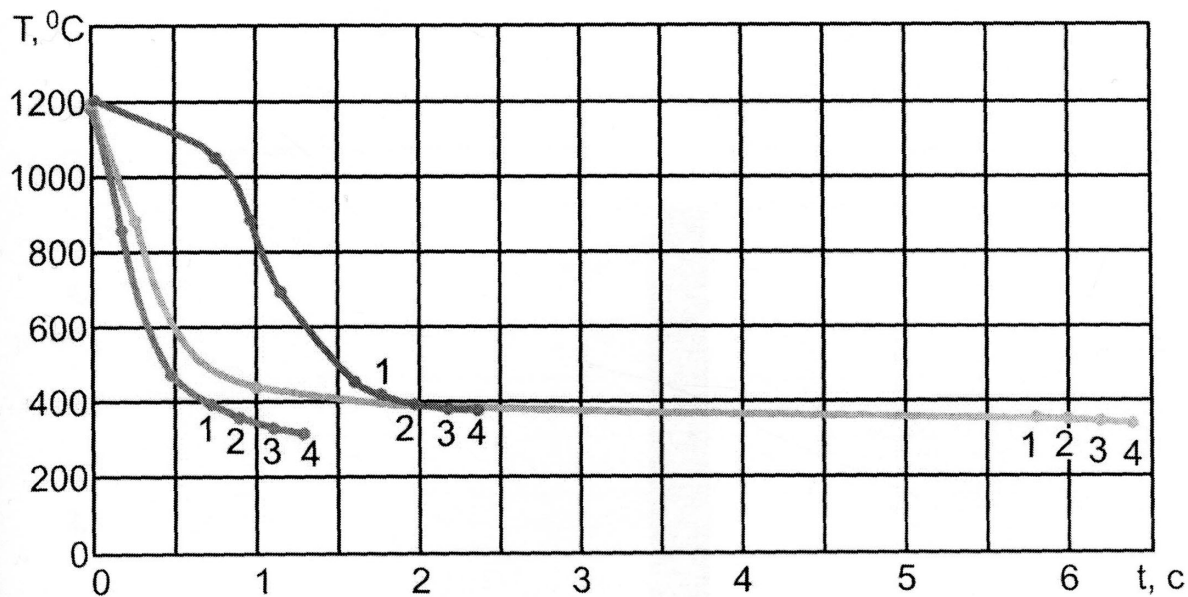


Рис. 6.47. Зависимость температуры газа ($^{\circ}\text{C}$) от времени его охлаждения (с):

● – вариант № 1; ● – вариант № 2; ● – вариант № 3

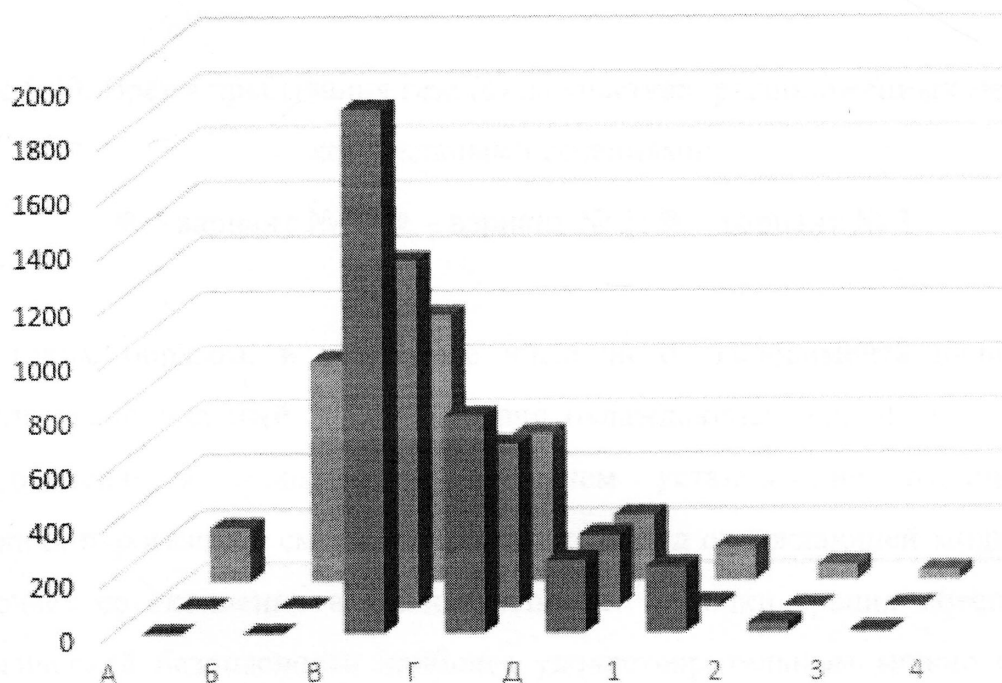


Рис. 6.48. Средняя скорость охлаждения газа ($^{\circ}\text{C}/\text{c}$) на участках, расположенных между контрольными сечениями:

● – вариант № 1; ● – вариант № 2; ● – вариант № 3

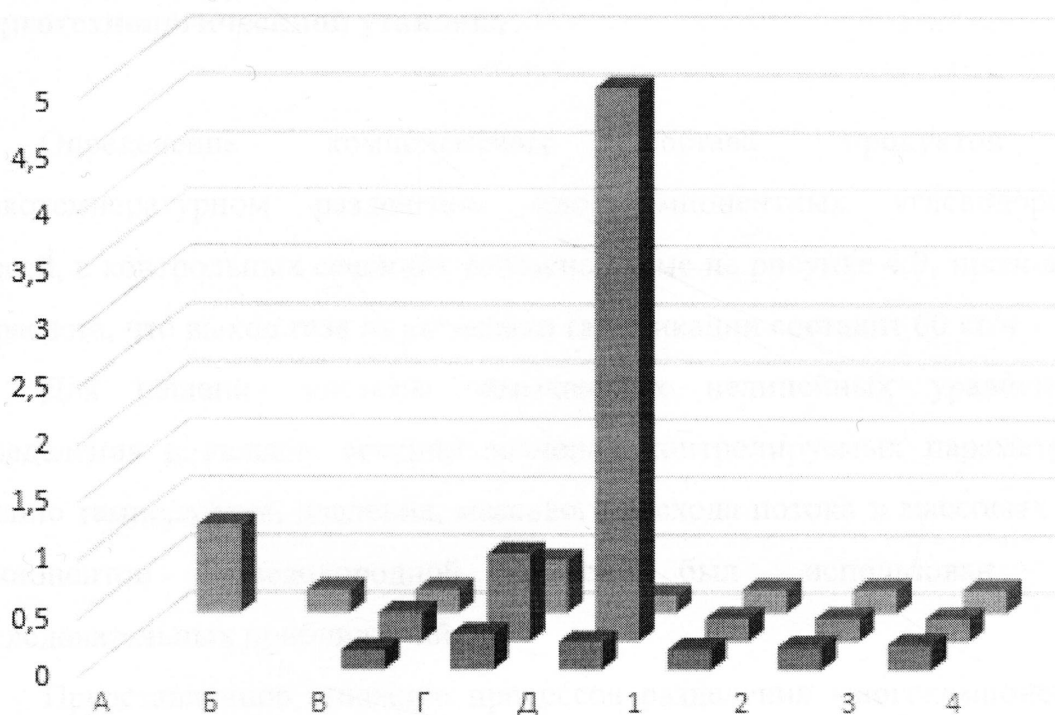


Рис.6.49. Время пребывания газа (с) на участках, расположенных между контрольными сечениями:

● – вариант № 1; ● – вариант № 2; ● – вариант № 3

Таким образом, в результате численного эксперимента видим, что наиболее рациональный вариант подачи охлаждающей жидкости – второй. Это объясняется наименьшим временем установления равновесного состояния парогазовой смеси, что снижает расход охлаждающей жидкости и исключает ее скопления в теплообменнике. С точки зрения обеспечения экологической безопасности наиболее удовлетворительным можно считать первый вариант, так как время охлаждения газа до температуры 305,8 °С составляет 1,32 с. При такой температуре образование диоксинов уже не происходит.

6.3. Численное моделирование процессов низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей в энерготехнологической установке

Определение компонентного состава продуктов при низкотемпературном разделении многокомпонентных углеводородных смесей, в контрольных сечениях согласно схеме на рисунке 4.9, проводилось из расчета, что выход газа из установки газификации составит 60 кг/ч.

Для решения системы замыкающих нелинейных уравнений и определения в каждом сечении значения контролируемых параметров, а именно температуры, давления, массового расхода потока и массовых долей компонентов углеводородной смеси был использован метод последовательных приближений.

Представленное описание процессов разделения многокомпонентных углеводородных смесей, образующихся при газификации отходов, позволяет путем численного моделирования осуществлять проектирование энерготехнологической установки с последующей оптимизацией ее параметров в целях повышения эффективности и снижения энергетических затрат при газификации отходов. Полученные численные значения (табл. 6.6) показывают, что результатом внедрения установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей является формирование потоков-энергоносителей. Потоки с высоким содержанием метана 91,5 % (сечение 28, рис. 4.9) и 83,4 % (сечение 27, рис. 4.9) представляют собой сжатый продукт и могут быть использованы как моторное топливо. Газовый поток, полученный в сечении 26 (рис. 4.9), является топливным газом, пригодным для поддержания процесса газификации отходов.

Таблица 6.6. Массовые доли компонентов углеводородной газовой смеси в контрольных сечениях

Номер сечения	Давление, МПа	Температура, °С	Расход, кг/ч	Массовый состав продукта			
				СН ₄	Н ₂	СО	Н ₂
1	0,1	30	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
2	0,1	30	54,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
3	0,1	30	6,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
4	0,6	250,7	54,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
5	0,6	250,7	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
6	0,6	30	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
7	0,6	30	16,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
8	0,6	30	9,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
9	0,6	30	34,2	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
10	0,6	-168,1	16,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
11	0,6	-130,6	9,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
12	0,6	-119,7	34,2	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
13	0,6	-150,4	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
14	0,6	-150,4	55,21	0,3358	0,0212	0,4553	0,1877
15	0,6	-150,4	4,79	0,8347	0	0,1228	0,0424
16	22,0	-135,6	4,79	0,8347	0	0,1228	0,0424
17	0,6	-151,8	55,21	0,3358	0,0212	0,4553	0,1877
18	0,596	-177,5	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
19	0,6	-140,7	20,17	0,9152	0	0,0679	0,0168
20	0,6	-140,8	20,17	0,9152	0	0,0679	0,0168
21	0,115	-194,6	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
22	0,6	250,7	6,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
23	22,0	-124,7	20,17	0,9152	0	0,0679	0,0168
24	0,115	-194,6	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
25	0,115	-172,8	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
26	0,115	11,00	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
27	22,0	17,16	4,79	0,8348	0	0,1228	0,0424
28	22,0	-3,17	20,17	0,9153	0	0,0679	0,0168

Очевидно, что предложенная схема низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей и математическое описание процессов, происходящих в ее функциональных элементах, являются удовлетворительными в рамках поставленной задачи и показывают возможность ее реализации. Однако не исключено существование еще более совершенного варианта, для поиска которого в дальнейшем можно сформулировать и решить соответствующую задачу оптимизации.

После установки разделения газовых потоков в соответствии со схемой на рис. 4.9 может быть получено 17,72 кг/ч продукта 1 с содержанием метана 91,5 %, 7,52 кг/ч продукта 2 с содержанием метана 83,4 % и 34,76 кг/ч продукта 3 (топливного газа для газификации).

Следует отметить, что в конденсаторе ректификационной колонны К-1 предполагается использование хладагента с температурой не выше -182°C , позволяющего отводить тепловую мощность 2,836 кВт. По температурному уровню в качестве такового может служить жидкий азот. При скрытой теплоте испарения при нормальных условиях $\Psi = 197,6 \text{ кДж/кг} \cdot \text{K}$ расход хладагента составляет 51,7 кг/ч. Таким образом, исключить использование жидкого азота и тем самым снизить затраты на обеспечение данного процесса возможно в случае отсутствия конденсатора в составе ректификационной колонны. При реализации такого варианта не удастся отделить весь метан из «верхнего» потока, о чем свидетельствуют результаты численного моделирования (табл. 6.7).

Схема такого варианта установки низкотемпературного разделения газовых смесей представлена на рис. 6.50. Количество продуктов, получаемых на выходе из установки составляет: 5,242 кг/ч продукта 1 с содержанием метана 99,98 %; 54,76 кг/ч продукта 2 с малым содержанием метана.

Таблица 6.7. Массовые доли компонентов углеводородной газовой смеси в контрольных сечениях по схеме при отсутствии реконденсатора

Номер сечения	Давление, МПа	Температура, °С	Расход, кг/ч	Массовый состав продукта			
				СН ₄	Н ₂	СО	Н ₂
1	0,1	30	67,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
2	0,1	30	64,41	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
3	0,1	30	3,39	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
4	0,6	250,7	64,41	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
5	0,6	250,7	67,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
6	0,6	30	67,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
7	0,6	30	35,59	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
8	0,6	30	7,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
9	0,6	30	24,41	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
10	0,6	-163,2	35,59	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
11	0,6	-130,9	7,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
12	0,6	-19,28	24,41	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
13	0,6	-150	67,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
14	0,6	-150	63,71	0,3458	0,0208	0,4486	0,1847
15	0,6	-150	4,09	0,8398	0	0,1190	0,0412
16	22,0	-135,2	4,09	0,8398	0	0,1190	0,0412
17	0,6	-151,9	63,71	0,3458	0,0208	0,4486	0,1847
18	0,596	-151,8	59,8	0,3030	0,0222	0,4780	0,1968
19	0,6	-134,5	3,912	0,9998	0	0,0002	0
20	0,6	-139,5	3,912	0,9998	0	0,0002	0
21	0,115	-172,7	59,8	0,3030	0,0222	0,4780	0,1968
22	0,6	250,7	3,39	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
23	22,0	-123,5	3,912	0,9998	0	0,0002	0
24	0,115	-172,7	59,8	0,3030	0,0222	0,4780	0,1968
25	0,115	-164,8	59,8	0,3030	0,0222	0,4780	0,1968
26	0,115	23	59,8	0,3030	0,0222	0,4780	0,1968
27	22,0	20	4,09	0,8398	0	0,1190	0,0412
28	22,0	20	3,912	0,9998	0	0,0002	0

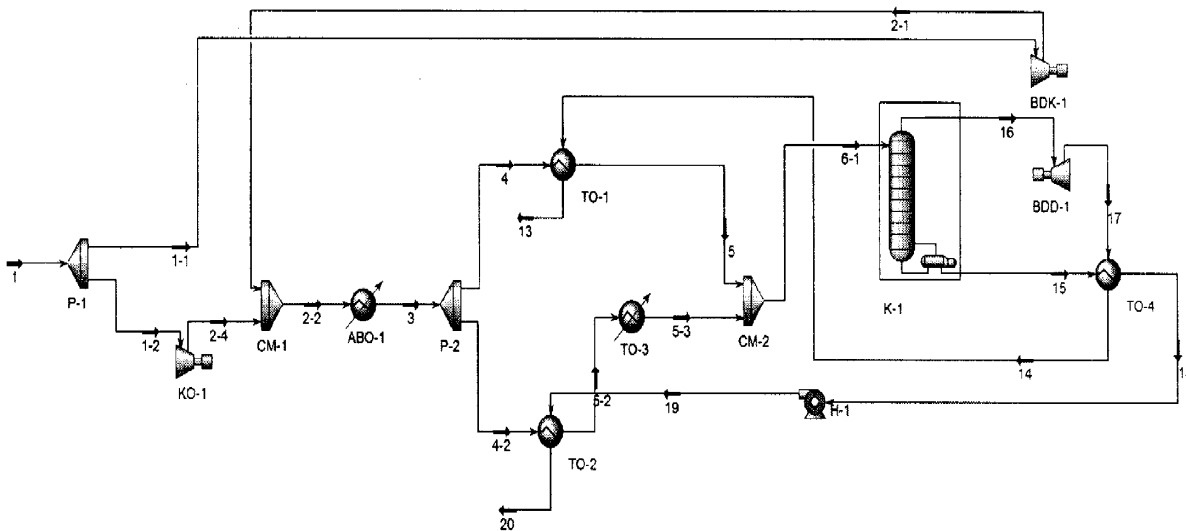


Рис. 6.50. Схема установки низкотемпературного разделения газа с ректификационной колонной без конденсатора

В данном варианте незначительный выход чистого метана в виде компримированного продукта в данной схеме свидетельствует о нецелесообразности реализации данного варианта. Возможность увеличения выхода чистого метана может быть обеспечена за счет увеличения давления сжатия смеси в компрессоре КО-1, однако при этом возникают проблемы организационного порядка, связанные с безопасностью функционирования объектов, работающих под высоким давлением.

Разработанная математическая модель процесса разделения многокомпонентных углеводородных смесей в ректификационной колонне и математические модели других функциональных элементов, обслуживающих процесс разделения, позволяют путем численного моделирования осуществлять проектирование ЭТУ с последующей оптимизацией параметров потоков с целью обеспечения высокой эффективности процесса разделения газовой смеси за счет снижения энергопотребления. При математическом описании процессов были использованы общепринятые соотношения технической термодинамики. Параметры ректификационной колонны, рассчитанные с использованием предложенной математической модели, подтверждают возможность практической реализации предложенной

схемы ЭТУ. Результатом внедрения установки низкотемпературного разделения газовых смесей, полученных при высокотемпературной утилизации отходов, является формирование потока с высоким содержанием метана, который может быть использован как компримированное углеводородное горючее, и потока горючей смеси, пригодной для поддержания процесса газификации отходов при их утилизации.

6.4. Выводы по разделу

1. В рамках разработанной численной модели получены расчетные оценки среднего, максимального и минимального значений температуры парогазовой смеси и содержащейся в ней массовой доли водяного пара в контрольных сечениях газоотводной трубы, которые позволяют судить об эффективности охлаждения генераторного газа впрыском капель воды. При этом из трех исследуемых режимов удовлетворительным можно признать второй вариант, при котором максимальная температура парогазовой смеси в сечении № 1, № 2, № 3 и № 4 превышает равновесную (454 °С) всего лишь на 60 °С, 9 °С, 6 °С и 4 °С соответственно. Это объясняется наименьшим временем установления равновесного состояния парогазовой смеси, что снижает расход охлаждающей жидкости и исключает ее скопление в теплообменнике.

2. Численный эксперимент по исследованию параметров движения элементарного объема газа в проточной части теплообменника показал, что с точки зрения обеспечения экологической безопасности наиболее удовлетворительным можно считать вариант, при котором снижение температуры газа до значения 305,8 °С происходит в течении 1,32 с.

3. Впервые созданы научные основы применения технических устройств и систем для охлаждения отходящих газов, использование которых предотвращает повторное образование высокотоксичных веществ и тем самым способствует обеспечению экологической безопасности.

4. Используя метод последовательных приближений в каждом контрольном сечении определены значения температуры, давления, массового расхода потока и массовые доли компонентов углеводородной газовой смеси. Численный эксперимент показал, что результатом внедрения установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей является формирование потоков-энергоносителей. Потоки с высоким содержанием метана 91,5 % (сечение 28, рис. 4.9) и 83,4 % (сечение 27, рис. 4.9) представляют собой сжатый продукт и могут быть использованы как моторное топливо. Газовый поток, полученный в сечении 26 (рис. 4.9), является топливным газом, пригодным для поддержания процесса газификации отходов.

5. Отказ от использования дефлегматора (конденсатора) ректификационной колонны приводит к уменьшению общего выхода товарных продуктов почти в 4 раза и значительному уносу метана с продуктом 3 (мольных 35 %).

РАЗДЕЛ 7

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

7.1. Целесообразность применения разработанной экологически безопасной технологии утилизации отходов

В настоящее время наиболее распространенными способами переработки отходов являются: инсинерация, пиролиз и газификация (технология 1). В результате переработки отходов получается синтез-газ, включающий в себя, кроме окиси углерода (CO) и водорода (H₂), еще и другие компоненты, такие, как двуокись углерода (CO₂), окислы азота (NO_x), небольшое количество метана (CH₄), этилен (C₂H₄) и др. Полученный низкокалорийный газ используется для непосредственного сжигания и получения тепла для хозяйственных нужд или для парогенераторов с последующим использованием пара в паровых турбинах с выработкой электроэнергии. Продуктами таких установок является электроэнергия и теплота.

В то же время установки, реализующие данные способы переработки отходов не обеспечивают экологической безопасности при переработке токсичных, медицинских отходов, композитных материалов и обычных ТБО и требуют дополнительной обработки твердых отходов (шлаков) и газов.

Альтернативой этому является технология использующая генераторы плазмы, которая заключается в разложении сложных молекул диоксинов и

фуранов в простые в условиях экстремально высоких температур и при отсутствии свободного кислорода.

При температуре плазменной струи полностью разрушаются любые органические и биологические материалы, гарантировано уничтожаются самые токсичные материалы, переплавляются и испаряются самые тугоплавкие неорганические соединения.

Процесс плазменной газификации обеспечивает экологически чистую переработку сырья (отходов) без образования смол и диоксинов. Продуктом плазменной газификации является высококалорийный горючий газ и нейтральный твердый остаток в виде стекловидного шлака, не требующего дополнительной обработки. Он может быть гранулирован и направлен в строительство, полученный металл также может быть использован вторично.

Плазменная технология утилизации отходов предполагает большие затраты электроэнергии в отличие от процессов высокотемпературного пиролиза или газификации, которые используют в качестве топлива получаемый газ. Как показали исследования авторов, для плазменной утилизации отходов нужны затраты, сопоставимые со стоимостью производства первичной продукции [23]. В условиях массовой утилизации отходов и чрезвычайно высоких температур происходит быстрое изнашивание электродов плазменных генераторов и ввиду их небольшого ресурса требуется регламентное обслуживание плазмотронов [299].

С другой стороны экспериментально доказано, что синтез-газ, полученный при плазменной технологии утилизации более калорийный, чем при традиционной газификации [261, 304, 307].

Проведена сравнительная оценка экономического эффекта от использования технологии обычной газификации (технология 1), обеспечивающей получения в качестве продуктов электроэнергии и тепла и усовершенствованная плазменная технология (технология 2).

В усовершенствованной плазменной технологии происходит предварительное разложение отходов в обычном газификаторе, после чего

образовавшиеся продукты: парогазовая смесь (синтез-газ) и шлак подвергаются обработке в плазменной струе, где происходит полное удаление токсичных веществ. Усовершенствованная технология 2 предполагает также дальнейшее обогащение полученного синтез-газа метаном путем осуществления процесса метанирования, очистку и низкотемпературное разделения газа для получения топливных продуктов. Таким образом, продуктами, переработки отходов по технологии 2 в отличие от технологии 1 являются кроме тепла и электроэнергии сжиженный или газообразный метан и синтетический газ, содержащий метан, что позволяет компенсировать суточные и годовые неравномерности потребления электроэнергии путем создания запасов.

В данном разделе приведены результаты сравнения технологии 1 и 2 по потреблению энергии, а также проведены экономические оценки прибыли, срока окупаемости и других экономических параметров.

7.2. Энергетическая оценка экологически безопасного процесса утилизации отходов

Для проведения энергетической оценки целесообразности применения усовершенствованной технологии сравнительный расчет проводился из стандартных условий, а именно был выбран наиболее типичный вариант и вид отходов - переработка твердых бытовых отходов производительностью 1,6 т/сут (66,8 кг/ч, 529 т/год). Исходные данные и результаты сравнительных расчетов приведены в табл. 7.1.

В результате переработки по технологии 1 продуктами топливный газ в количестве 60 кг/ч и шлак – 6,8 кг/ч.

По технологии 2 продукты: сжиженный или газообразный метан при давлении 25 МПа - 16,8 кг/сут, сжиженный или газообразный синтетический газ (94% метана) - 6,2 кг/ч, топливный газ 37,1 кг/ч, шлак - 6,8 кг/ч.

Таблица 7.1 Сравнительная оценка по количеству производимой энергии

Сравнительные параметры	Технология 1	Технология 2
Количество сырья кг/ч	66,80	66,80
Количество сырья т/сут	1,60	1,60
Количество сырья т/год	529,06	529,06
Продукты в час		
метан сжиженный, кг/сут		16,80
синтетический газ (94 % метана), кг/ч		6,20
топливный газ для отопления, кг/ч	60	37,10
шлак, кг/ч	6,8	6,68
Продукты в год (330 суток)		
метан сжиженный, т/год		133,06
синтетический газ (94 % метана), т/год		49,10
топливный газ для отопления, т/год	380,16	235,07
Состав, %		
N ₂	3	20,6
CH ₄	11	0,1
H ₂	31	31,14
CO	23	48,16
C ₂ H ₄	4	
CO ₂	28	
Низшая теплотворная способность, кДж/м ³	12584	9467
плотность, кг/м ³	0,96	0,827
Низшая теплотворная способность, кДж/кг	12081	7829
Низшая теплотворная способность, кВт.ч/кг	3,36	2,17

КПД парогенератора	0,9	0,9
Тепловая энергия, кВт·ч/ч	181,21	72,62
Тепловая энергия, кВт·ч/ГОД	1435180	575123
КПД парового цикла	0,3200	0,3200
электроэнергия в паровом цикле, кВт·ч/ГОД	459258	184039
или		
КПД газотурбинного цикла	0,45	0,45
электроэнергия в ГТ цикле, кВт·ч/ГОД	645831	258805
шлак, т/год	53,86	52,91
Пересчет на 1 т сырья		
Продукты т на 1 т сырья		
метан сжиженный, т/т сырья		0,25
синтетический газ (94 % метана), т/т сырья		0,09
топливный газ для отопления, т/т сырья		0,44
тепловая энергия, кВт·ч/т сырья	2713	1087
электроэнергия в паровом цикле, кВт·ч/т сырья	868,07	347,86
или		
электроэнергия в ГТ цикле, кВт·ч/ГОД	1220,72	489,18
шлак, т/т сырья	0,10	0,10

В установке с обычной газификацией продуктами является тепло или электроэнергия. Для сопоставления двух технологий количество тепла выражалось в количестве эквивалентной электроэнергии.

Для определения количества электроэнергии и теплоты, которая может быть получена из топливного газа, необходимо задать его теплотворную способность, которая определяется составом газа.

Для технологии 1 типовой состав синтез-газа, который получается в процессе газификации ТБО, включает в себя компоненты: N_2 – 3%, CH_4 – 11%, H_2 – 31%, CO – 23%, C_2H_4 – 4%, CO_2 – 28%.

В технологии 2 принят худший вариант, когда в качестве плазмообразующего газа используется воздух, что не является самым благоприятным, поскольку образуется много азота, который балластирует топливный газ и снижает его теплотворную способность. Более целесообразным является использование водяного пара в этом случае азот и его окислы практически отсутствуют.

Состав топливного газа по технологии 2, который получается после отделения полезных продуктов в виде метана и синтетического газа: N_2 – 20,6%, CH_4 – 0,1%, H_2 – 31,14%, CO – 48,16%.

Низшая теплотворная способность топлива является аддитивной функцией и определяется, как сумма теплотворных способностей горючих компонентов, составляющих топливо [194]:

$$Q_n = Q_n^{CH_4} \cdot r^{CH_4} + Q_n^{H_2} \cdot r^{H_2} + Q_n^{CO} \cdot r^{CO} + Q_n^{C_2H_4} \cdot r^{C_2H_4}, \quad (7.1)$$

где Q_n^i – низшая теплотворная способность компонента, r_i – объемная доля i -го компонента.

Низшая теплотворная способность на 1 кг топлива равна:

$$Q_{nm} = \frac{Q_n}{\rho}, \quad (7.2)$$

где ρ – плотность топлива, которая равна сумме плотностей долей компонентов, составляющих топливо. Значение их приведено в таблице 7.1.

Результаты расчетов показывают, что низшая теплотворная

способность газа по технологии 1 составляет 12584 кДж/м^3 (12081 кДж/кг), а по технологии 2 – 9467 кДж/м^3 (7829 кДж/кг). Обычная газификация обеспечила большую теплотворную способность вследствие наличия значительного количества азота, чем при плазменной газификации.

Топливный газ направляется в парогенератор либо на сжигание в камере сгорания и далее на турбину для получения электроэнергии. Энергетическое сравнение производится по количеству эквивалентной электроэнергии, производимой топливным газом.

Рассматривается производство электроэнергии в паровом цикле и при непосредственном сжигании топлива с использованием газовой турбины.

При расчете парового цикла принято, что КПД парогенератора равно 90 %, КПД парового цикла составляет 32 %, тогда количество полученной электроэнергии определяется по формуле:

$$E_{\text{эл.эн.}} = Q_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{пг}} \cdot \eta_{\text{пц}}, \quad (7.3)$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая теплотворная способность топливного (синтез) газа; $\eta_{\text{пг}}$ – КПД парогенератора; $\eta_{\text{пц}}$ – КПД парового цикла.

При получении электроэнергии на газотурбинной установке принято, что потери тепловой энергии составляют 10 %, а КПД газотурбинной установки равен 50 %. Количество полученной электроэнергии равно:

$$E_{\text{эл.эн.}} = 0,9 Q_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{гтц}}, \quad (7.4)$$

где $\eta_{\text{гтц}}$ – КПД газотурбинного цикла.

Расчеты показали, что электроэнергия, произведенная в технологии 1 в паровом цикле составляет $868 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ сырья, в газотурбинном цикле –

1221 кВт·ч/т сырья. В технологии 2 количество электроэнергии составляет соответственно – 348 кВт·ч/т сырья и 489 кВт·ч/т сырья.

7.3. Экономическая оценка технологического процесса утилизации отходов

В качестве критерия экономической оценки применения усовершенствованной технологии было предложено сравнение обеих технологий по оценке прибыли и сроков окупаемости установок.

Результаты расчетов прибыли и сроков окупаемости установок при использовании обеих технологий приведены в таблице 7.2. Все расчеты выполнены в долларах США и приведены на тонну перерабатываемого сырья.

Таблица 7.2. Сравнение экономических показателей по двум технологиям

Показатели	Техн. 1	Техн.2	Техн. 1	Техн. 2
Оптовая цена продукта				
метан сжиженный, \$/т сырья		400,00		400,00
синтетический газ сжиженный (метан 94 %), \$/т сырья		400,00		400,00
электроэнергия, \$/кВт·ч	0,11	0,11	0,11	0,11
шлак, \$/т сырья	1,00	1,00	1,00	1,00
Количество продукта				
метан сжиженный, \$/т сырья		100,60		100,60
синтетический газ сжиженный (метан 94 %), \$/т сырья		37,13		37,13
электроэнергия, \$/т сырья	95,49	38,26	95,49	38,26

(парогазовый цикл)				
или				
электроэнергия, \$/т сырья (газотурбинный цикл)	134,28	53,81	134,28	53,81
шлак, \$/т сырья	0,10	0,10	0,10	0,10
металл, \$/т сырья		0,00		0,00
Поступления от переработки отходов, \$/т сырья	65,00	65,00	65,00	65,00
Доход от реализации продуктов, \$/т сырья	160,59	241,09	160,59	241,09
Общий годовой доход, \$	84961	127550	84961	127550
Капитальные вложения				
стоимость оборудования, тыс. \$	80	120,00	31,74	40,63
строительно-монтажные работы, тыс. \$	16	32,00	16	32,00
предпроизводственные затраты, тыс. \$	12	24,00	12	24,00
Всего капитальные затраты, тыс. \$	108,00	176,00	59,74	96,63
подлежат амортизации, тыс. \$	96,00	152,00	47,74	72,63
Эксплуатационные затраты, тыс. \$				
амортизационные отчисления (10 %), тыс. \$	9,60	15,20	4,77	7,26
капитальный ремонт (5 %), тыс. \$	4,80	7,60	2,39	3,63
текущий ремонт(1,6 %), тыс. \$	1,54	2,43	0,76	1,16
Потребление электроэнергии				
плазмотроны, кВт·ч/т		240,00		240,00
блок разделения и другие потребители	50	246,00	50	246,00
Сумма потребляемой электроэнергии	50,00	486,00	50,00	486,00

Тариф на электроэнергию, \$/кВт·ч	0,11	0,11	0,11	0,11
Затраты на электроэнергию, тыс. \$	2,91	28,28	2,91	28,28
Заработная плата, тыс. \$	36,00	36,00	36,00	36,00
Начисления на зарплату (37,5 %), тыс. \$	13,50	13,50	13,50	13,50
Дополнительные затраты, тыс. \$	4,0	4,0	4,0	4,0
в том числе:				
инновационный фонд, тыс. \$	1,3	1,3	1,3	1,3
отчисления на содержание дорог, тыс. \$	1,2	1,2	1,2	1,2
другие, тыс. \$	1,5	1,5	1,5	1,5
Всего эксплуатационные затраты, тыс. \$	72,3	107,0	64,3	93,8
Прибыль, \$/т сырья	12615,0	20534,5	20625,6	33709,7
Окупаемость, лет	8,6	8,6	2,9	2,9

Оптовая цена продукции, получаемой на установках, определена на основании цен, приведенных в Интернете. Цена продукции для технологии 1 определяется по стоимости эквивалентной электроэнергии и составляет \$0,11 за 1 кВт/ч.

Для технологии 1 продуктами являются кроме электроэнергии сжиженный метан и сжиженный синтетический газ. Цена их принята одинаковой и составляет \$400 за тонну.

Кроме того в обеих технологиях продуктом является также шлак.

Общий годовой доход определяется как сумма произведений цены продукта и количества произведенного продукта данного наименования на тонну сырья. При оценке стоимости электроэнергии за основу принят парогазовый цикл, т.к. дает меньший доход, чем газотурбинный.

Кроме того, в доход входят поступления от платы коммунальных служб за переработку отходов.

Общий годовой доход в технологии 1 составил \$84961, а в технологии 2 - \$127550. Увеличение годового дохода обеспечивается за счет дополнительного продукта – сжиженного метана.

Установки, выполненные для реализации технологии 1 и технологии 2, различаются, прежде всего, капитальными вложениями. Установка по технологии 2 имеет большие капитальные вложения, чем установка по технологии 1, вследствие того, что добавлены два дополнительных блока: метанирования и разделения газа. Кроме того плазмотроны требуют применения мощных источников питания и системы управления.

В таблице 7.2 в первых двух столбцах приведены результаты расчетов с учетом капитальных вложений, необходимых для изготовления конкретной установки данной производительности по перерабатываемому сырью.

Капитальные вложения серийной установки переработки отходов с использованием плазмы определялись путем составления калькуляции расходов с учетом действующих цен на комплектующее оборудование, изготовление нестандартного оборудования, зарплаты и прочих расходов с учетом НДС. Для установки обычной газификации с получением синтез-газа, предназначенного для выработки электроэнергии капитальные вложения приняты в 1, 5 раза меньше.

Соответственно строительно-монтажные работы и предпроизводственные затраты приняты по стоимости в 2 раза больше, т.к. связаны с большим количеством оборудования.

Суммарные капвложения при использовании технологии 1 составляют \$108 тыс., а технологии 2 - \$176 тыс, т.е. в 1,63 раза больше.

Амортизации подлежат стоимость оборудования и строительно-монтажные работы.

Эксплуатационные расходы включают в себя:

1. Амортизационные отчисления, составляющие 10% от капвложений, подлежащих амортизации;

2. Затраты на капремонт – 5%

3. Затраты на текущий ремонт 1, 6%.

4. Затраты на электроэнергию. Потребление электроэнергии при использовании технологии 2 существенно больше. Здесь учитывалось потребление электроэнергии плазмотронами, блоком разделения газов и другими потребителями.

В технологии 2 потребление электроэнергии плазмотронами принято исходя из опытных данных для установок компании Europlasma – 240 кВт.ч/т сырья.

Потребление электроэнергии в блоке разделения совместно с другими потребителями (компрессор для плазмообразующего газа) определено на основе расчета и составило 246 кВт.ч/т сырья. Суммарное потребление электроэнергии составляет 486 кВт.ч/т сырья.

В технологии 1 потребление электроэнергии принято равным 50 кВт.ч/т сырья, что почти в 10 раз меньше. Соответственно затраты на электроэнергию также в 10 раз меньше, чем при плазменном процессе.

5. Заработная плата принята одинаковой для обеих технологий. Обслуживающий персонал состоит из 6 человек, работает в течение 12 месяцев с средней зарплатой на каждого \$500 в месяц.

6. Начисления на зарплату составляют 37,5% в обоих случаях.

7. Дополнительные затраты, связанные с отчислениями в инновационный фонд, расходы на содержание дорог, другие затраты приняты одинаковыми.

Суммарные эксплуатационные затраты составили \$72,3 тыс. для технологии 1 и \$107 тыс. для технологии 2.

Таким образом по капвложениям и эксплуатационным затратам плазменная технология значительно превышает обычную газификацию.

Прибыль P рассчитывается по формуле:

$$P = D - E,$$

где D – годовой доход, E – эксплуатационные затраты.

Срок окупаемости установки равен:

$$T = KB_0 / P.$$

Сравнение двух технологий показывает, что в обычной газификации по технологии 1 прибыль составляет \$12615, в технологии 2 - \$20534,5, что в 1,6 раза больше.

Срок окупаемости, рассчитанный по приведенной формуле, одинаков и составляет 8,6 лет.

Расчеты показали, что во многом экономические показатели зависят от правильности расчета кап. вложений. Для проверки были проведены дополнительные расчеты экономических показателей, приведенные в двух последних столбцах таблицы 2.

Во этом случае оценка капитальных вложений производилась на основе работы [282], в которой кап. вложения для обычной схемы газификации составляют \$60/тонну сырья, а для установки плазменной обработки составляет \$76,8/тонну, что составляет соотношение 1,3 раза, что меньше, чем принято нами ранее.

Суммарные капитальные вложения получились меньше, чем в первом случае, поскольку не учтено увеличение их при уменьшении производительности.

Все остальные расчеты выполнены в соответствии с приведенными выше данными и формулами. Срок окупаемости в этом случае составил 2,9 года.

Результаты расчетов показали, что срок окупаемости одинаков в обоих случаях, однако прибыль, получаемая в установке с получением топливных продуктов выше, чем при обычной газификации и получением только электроэнергии. Таким образом, после завершения срока окупаемости оборудования, прибыль, получаемая на установке, использующей

плазменную технологию с последующим метанированием и разделением синтез-газа будет в 1,6 раза больше, чем в обычной газификации.

Кроме того данная установка позволяет компенсировать суточные и сезонные неравномерности потребления электроэнергии и тепла путем создания пригодных для хранения и последующей реализации топливных продуктов. Установка обеспечивает переработку шлаков и не требует дополнительной их обработки для дальнейшего использования в строительстве.

7.4. Экономическая оценка эффекта от реализации экологически безопасной технологии утилизации

Общая экономическая оценка установки технологического процесса утилизации отходов выражается в расчете прибыли и сроков окупаемости.

Получаемый газ, состоящий из 94% метана также пригоден для заправки транспорта, как и чистый метан, согласно ГОСТ 5542-87, поэтому цена на него принята такая же, как и на чистый метан. Топливный газ имеет вдвое меньшую стоимость, которая возвращается в виде потребленного тепла. Мощность, потребляемая установкой, составляет 200 кВт. В табл. 7.3 приведен расчет прибыли и сроков окупаемости установки.

Таблица 7.3. Результаты расчета прибыли и сроков окупаемости установки

Общее количество сырья т/сут	Qgt	1,8
Извлекаемый продукт		
метан газообразный, т/сут	Quv	0,408
метан 94%, т/сут		0,149
топливный газ для отопления, т/сут		0,712
шлак, т/сут		0,18
Добыча углеводородов в год		
метан газообразный, т/год	Qgty	134,64
метан 94%, т/год	Quvy	49,17

топливный газ для отопления, т/год		234,96
шлак, т/год		59,4
Оптовая цена предприятия		
метан газообразный, \$/т	Cg	350
метан 94%, \$/т	Ck	350
топливный газ для отопления, \$/т		150
шлак, \$/т		30
Капитальные вложения		
стоимость оборудования, тыс.\$	Cob	60
строительно-монтажные работы, тыс.\$	Ccmr	16
предпроизводственные затраты, тыс.\$	Cpp	12
Всего кап. затраты, тыс.\$		88
подлежат амортизации, тыс.\$		76
Эксплуатационные затраты, тыс.\$		
Амортизационные отчисления (10%), тыс.\$	Fao	7,6
Капитальный ремонт (5%), тыс.\$	Fkr	3,8
Текущий ремонт(1,6%), тыс.\$	Ftr	1,216
Расход эл.энергии, кВтч/т		3312,6
Тариф на эл.энергию, \$/кВт.ч		0,08
Затраты на эл. энергию, тыс.\$		0,5
Заработная плата (6x500x12), тыс.\$		36
Начисления на зарплату(37,5 %), тыс.\$	Fnzp	13,5
Другие затраты, тыс.\$		2,1
в том числе:		
инновационный фонд, тыс.\$	Zin	0,5
отчисления на содержание дорог, тыс.\$	Zsd	0,6
другие	Zdr	1
Всего эксплуатационные затраты, тыс.\$	Zex	64,7
Себестоимость продуктов, \$/т	C	154,48
Прибыль, тыс.\$/год	Pvn	36,67
Окупаемость, лет	Tokup	2,40

Описанная технология утилизации отходов жизнедеятельности позволяет путем газификации а также последующей плазменной обработкой с метанированием, получить газ, обогащенный метаном. Разделение этого газа дает продукты в виде топливного газа, пригодные к реализации в качестве товарных продуктов. Кроме того, в результате переработки сырья получается также твердый продукт, который может быть использован в строительной индустрии.

Процесс является экологически чистым благодаря использованию плазменной обработки сырья, которая предотвращает образование вредных и ядовитых компонентов в твердых продуктах. Оценка экономического эффекта от применения данной установки показывает, что установка, перерабатывающая 1800 кг отходов в сутки обеспечивает 36,7 тыс \$ в год и низкий срок окупаемости капитальных вложений, который не превышает 2,9 лет.

7.5. Выводы по разделу

1. Проведена оценка эффективности предложенной технологии утилизации твердых углеродсодержащих отходов и доказана ее перспективность с точки зрения минимизации энергетических затрат, поскольку плазменной обработке подвергается не более 20% массы сырья.

2. Установлено, что экономический эффект от применения разработанной установки при переработке 1,8 т отходов в сутки составляет 36,7 тыс. Долларов в год, при этом срок окупаемости капитальных вложений не превышает 2,9 лет. Доказано преимущества предложенной экологически безопасной утилизации отходов перед обычной газификацией даже без учета экологической безопасности полученного твердого остатка.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основании выполненных теоретических и экспериментальных научных исследований и обобщения полученных результатов решена важная научно-практическая проблема обеспечения экологической безопасности при утилизации твердых углеродсодержащих отходов.

1. На основе принципа многоуровневой декомпозиции разработан методологический подход к созданию эффективных экологически безопасных технологий утилизации твердых углеродсодержащих отходов и средств ее реализации. Предложено методологическую схему решения задачи управления экологической безопасностью при обращении с твердыми углеродсодержащими отходами с возможностью получения продукции целевого назначения.

2. Доказано, что оптимальным способом обеспечения экологической безопасности технологического процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов является применение технологии утилизации на основе поэтапной высокотемпературной обработки сырья, что обеспечивает снижение расхода электроэнергии и потерь, связанных с выбросом топливного газа, который может быть вторичным энергетическим ресурсом. Уменьшение расхода электроэнергии происходит путем разделению процесса газификации на два этапа: газификации в термохимическом газогенераторе и дополнительной газификации в плазменном газогенераторе.

3. С использованием результатов дистанционного зондирования земной поверхности создана система оперативного выявления мест несанкционированного скопления отходов, которая позволяет определять характер отходов и динамику развития свалки. Система апробирована на

Дергачевском полигоне – выявлены ареалы с преобладанием углеродсодержащих материалов, в период с августа 2013 г. по октябрь 2014 г., установлено увеличение площади именно углеродсодержащих материалов с 29,6 тыс. м² до 162,1 тыс. м².

4. Разработана модель технологического процесса экологически безопасной утилизации твердых углеродсодержащих отходов, реализация которой исключает возможность образования высокомолекулярных токсичных выбросов, что связано с газификацией отходов при температуре около 1200 °С и резким охлаждением полученного генераторного газа. Обосновано применение низкотемпературного разделения полученных при газификации отходов многокомпонентных газовых смесей, позволяет не только использовать полученный энергоноситель для поддержания процесса газификации, но и учитывает суточную и сезонную неравномерность потребления энергии и позволяет получать метанвмисный энергоноситель, содержащий метан, пригодный для хранения.

5. Установлены закономерности процесса испарительного охлаждения газа с использованием математической модели, что позволило предложить конструктивные решения испарительного теплообменника, который обеспечивает реализацию экологически безопасной утилизации отходов. Обоснованно конструктивные решения термохимической печи, опираясь на законы тепломассообмена с учетом экстремальных температурных условий, создаваемых генераторами плазмы в качестве источника тепла. Разработана схема энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей, как исполнительной части системы управления экологической безопасностью процесса утилизации твердых углеродсодержащих отходов. Установлен компонентный состав энергопоток с использованием системы уравнений материального и энергетического баланса для стационарного режима работы установки. Два потока с высоким массовым содержанием метана 91,5 % и 83,4 % являются аналогом автомобильного компримированного природного газа, а третий

газовый поток - пригоден для поддержания процесса газификации отходов. Усовершенствованная автоматизированная система управления технологическим процессом утилизации отходов, позволяет осуществлять мониторинг всех его этапов и обеспечивает возможность интегрирования ее в общую систему обеспечения экологической безопасности.

6. При использовании численного моделирования установлено рациональный режим процесса охлаждения генераторного газа, при котором исключено образование диоксинов, фуранов и тому подобное. Определены температурные режимы, при которых проходит процесс распада сырья на молекулярном и атомарном уровне, а также физические параметры процесса охлаждения полученного газа, такие как скорость, время, и режим подачи охлаждающей жидкости. Наиболее рациональным является режим охлаждения, при котором снижение температуры газа с $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $305,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит 1,32 с.

7. Проведена оценка эффективности предложенной технологии утилизации твердых углеродсодержащих отходов и доказана ее перспективность с точки зрения минимизации энергетических затрат, поскольку плазменной обработке подвергается не более 20 % массы сырья. Установлено, что экономический эффект от применения разработанной установки при переработке 1,8 т отходов в сутки составляет 36,7 тыс. долларов в год, при этом срок окупаемости капитальных вложений не превышает 2,9 лет. Доказано преимущества предложенной экологически безопасной утилизации отходов перед обычной газификацией даже без учета экологической безопасности полученного твердого остатка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов, В. Н. Комплексный подход к системе удаления отходов лечебно профилактических учреждений [Текст] / В. Н. Абрамов, А. З. Разяпов // Чистый город. – 1998. – № 2. – С. 35–40.
2. Абросимов, А. Как ГИС помогают бороться со свалками [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cnews.ru/reviews/?2013/12/02/551840&sa=U&ved=0CBMQFjAAahUKEwiG_62j5cPNAhXmLHIKHaGMAEs&usg=AFQjCNHZJi3i7UVjLuRFX_gPAstB9JYVRg.
3. Александров, И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты [Текст] / И. А. Александров. – М.: Химия, 1971. – 296 с.
4. Ангорская, Л. Экологи выявили крупные свалки в районах Харьковщины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dozor.kharkov.ua/news/authority/1161790.html>.
5. Аристов, М. А. Мониторинг полигонов ТБО и обнаружение стихийных мусоросвалок по данным космической съемки [Текст] / М. А. Аристов // ГеоПрофиль. – 2009. – № 2. – С. 34–41.
6. Архив снимков [Электронный ресурс] // Земля из космоса: сайт. – Метеоспутник, 2005-2013. – Режим доступа: <http://meteosputnik.ru/archive>.
7. Багатоспектральні методи дистанційного зондування землі в задачах природокористування [Текст] / В. І. Лялько та ін. – К.: Наукова думка, 2006. – 358 с.
8. Бакластов, А. М. Теплотехнические расчеты металлургических печей [Текст] / А. М. Бакластов, А. А. Китаев. – М. : Металлургия, 1970. – 528 с.
9. Бахитова, Р. Х. Рациональное природопользование: управление, безопасность и риски [Текст] / Р. Х. Бахитова // Проблемы экономики и управления. – М., 2004. – № 1 – 2. – С. 228–247.

10. Белоцерковский, О. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент [Текст] / О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов. – М. : Наука, 1982. – 392 с.
11. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред [Текст] / О. М. Белоцерковский. – М. : Наука, 1984. – 520 с.
12. Берлінг, Р. З. Державне управління поводженням з твердими відходами: автореф. дис. ... канд. екон. наук: 08.02.03 / Берлінг Роман Збіславович; Національний ун-т «Львівська політехніка». – Л., 2004. – 20 с.
13. Бернадинер М. Н. Высокотемпературная обработка отходов. Плазменные источники энергии [Текст] / М. Н. Бернадинер, И. М. Бернадинер // Твердые бытовые отходы: науч.-практ. журн. – 2011. – № 4. – С. 1 – 19. – Режим доступа: <http://www.solidwaste.ru/magazine/archive/shownumber/2011/4.html>.
14. Бернадинер, И. М. Обезвреживание опасных отходов: выбор оптимальной технологии [Текст] / И. М. Бернадинер // Твердые бытовые отходы. 2010. – № 9. – С. 18–26.
15. Бернадинер, М. Н. Диоксины при термическом обезвреживании органических отходов [Текст] / М. Н. Бернадинер // Экология и промышленность России. – 2000. – № 2. – С. 13–16.
16. Биченок, М. М. Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні [Текст] / М. М. Биченок, О. М. Трофімчук. – К. : УІНСіР, 2002. – 268 с.
17. Білявський, Г. О. Основи екологічних знань [Текст] / Г. О. Білявський. – К. : Либідь, 1997. – 286 с.
18. Бірюков, Д. С. Про розробку геоінформаційної складової для системи підтримки прийняття рішень в сфері поводження з відходами [Текст] / Д. С. Бірюков, М. Ф. Махно // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій: міжнар. наук.-практ. конф. – К. – Х.: АР Крим, 2012. – С. 154–157.

19. Бобович, Б. Б. Утилизация отходов полимеров [Текст]: учеб. пособие. – М., 1998. – 62 с.
20. Боков, В. А. Основы экологической безопасности [Текст]: учеб. пособие / В. А. Боков, А. В. Лущик. – Симф. : СОНАТ, 1998. – 224 с.
21. В Винницкой области обнаружили свалку ртутных ламп. Экологи бьют тревогу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.segodnya.ua/ukraine/v-vinnickoy-oblasti-obnaruzhili-svalku-rtutnyh-lamp--629439.html>.
22. В Киеве на Позняках обнаружили незаконную свалку мусора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://korrespondent.net/kyiv/1383859-v-kieve-na-poznyakah-obnaruzhili-nezakonnuyu-svalku-musora-zhiteli-massiva-obratilis-v-prokuraturu>.
23. Вамболь В. В. Обеспечение экологической безопасности при обращении с отходами [Текст] / В. В. Вамболь, В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук // Междунар. науч.-исслед. журнал. – Екатеринбург, 2014. – № 11-2 (30). – С. 8–10.
24. Вамболь, В. В. Управление отходами на торговом предприятии [Текст] / В. В. Вамболь, Ю. С. Лещенко // Роль местной противовоздушной обороны и пожарной охраны в годы великой отечественной войны: междунар. науч.-практ. конф., 27 марта 2015. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2015. – С. 153–155.
25. Вамболь, В. В. Аспекты безопасности при обращении с отходами жизнедеятельности [Текст] / В. В. Вамболь, А. С. Чубенко // Стратегия «Казахстан-2050»: совершенствование системы защиты от чрезвычайных ситуаций, развитие научных исследований в сфере безопасности и жизнедеятельности населения: II науч.-практ. конф. курсантов и студентов, февраль 2014. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2014. – С. 301–303.
26. Вамболь, В. В. Возможность рациональной утилизации опасных отходов [Текст] / В. В. Вамболь, В. М. Кобрин, М. В. Нечипорук // Проблеми екологічної безпеки: міжнар. наук.-техн. конф. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 21.

27. Вамболь, В. В. Выбор структуры и параметров газокпельного потока в блоке охлаждения газа, полученного при термической обработке отходов [Текст] / В. В. Вамболь, В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Вып. 67. – Х., 2015. – С. 186–196.

28. Вамболь, В. В. К вопросу утилизации композиционных материалов с применением плазменной газификации [Текст] / В. В. Вамболь, Нечипорук Н. В., Кобрин Н. В., Полищук Е. А. // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій: міжвуз. наук.-практ. конф. – Х.: УЦЗУ, 2008. – С. 4–5.

29. Вамболь, В. В. Математическое моделирование газовой фазы охлаждения генераторного газа установки утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / В. В. Вамболь // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського : зб. наук. праць – № 6/2014 (89). – Ч. 1. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 148–152.

30. Вамболь, В. В. Математическое моделирование дисперсной фазы охлаждения генераторного газа установки утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / В. В. Вамболь // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць – № 2/2015 (91). – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 165–169.

31. Вамболь, В. В. Математическое описание процесса охлаждения генераторного газа при утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / В. В. Вамболь, В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш // Технологический аудит и резервы производства. – Х., 2015. – № 2/4 (22). – С. 23–29.

32. Вамболь, В. В. Математическое описание процесса охлаждения генераторного газа в установке утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / В. В. Вамболь, В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш // Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. пр. – Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х., НТУ «ХП», 2015. – № 18 (1127). – С. 24–35.

33. Вамболь, В. В. Метанирование генераторного газа, полученного при газификации отходов [Текст] / В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ, 2014. – С. 72.

34. Вамболь, В. В. Методологический подход обеспечение экологической безопасности физико-химического процесса утилизации композиционных материалов [Текст] / В. В. Вамболь, В. М. Шмандий, Т. Є. Рігас // Теория и практика тушения пожаров и ликвидации чрезвычайных ситуаций: VI міжнар. наук.-практ. конф., 12 – 13 грудня 2014 г. – Черкаси: НУЦЗУ, 2014. – С. 331.

35. Вамболь, В. В. Моделирование газодинамических процессов в блоке охлаждения генераторного газа установки для утилизации отходов [Электронный ресурс] / В. В. Вамболь // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – Вып. 1 (59). – 2015. – <http://ipb.mos.ru/ttb>.

36. Вамболь, В. В. Мониторинг несанкционированных мест скопления отходов с использованием космических снимков [Текст] / В. В. Вамболь, В. М. Шмандий, Д. Л. Крета // Технологический аудит и резервы производства. – Х., 2015. – № 5/6 (25). – С. 42–45.

37. Вамболь, В. В. Обеспечение экологической безопасности при утилизации РДТТ [Текст] / В. В. Вамболь, Н. В. Нечипорук, С. А. Вамболь // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій: міжвуз. наук.-практ. конф. – Х.: УЦЗУ, 2007. – С. 27–28.

38. Вамболь, В. В. Плазменная газификация при утилизации элементов летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов [Текст] / В. В. Вамболь, Д. Н. Макаренко // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій: міжвуз. наук.-практ. конф. – Х.: НУЦЗУ, 2010. – С. 64–65.

39. Вамболь, В. В. Получение топливных продуктов при утилизации опасных ТБО [Текст] / В. В. Вамболь, С. С. Зинченко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2014: всеукр. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ, 2014. – С. 13.

40. Вамболь, В. В. Проблема скопления ТБО и методы их утилизации [Текст] / В. В. Вамболь, М. Р. Мірсултанова // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ, 2014. – С. 86.

41. Вамболь, В. В. Пути утилизации медицинских отходов [Текст] / В. В. Вамболь, С. С. Зинченко // Проблеми екологічної безпеки: міжнар. наук.-техн. конф. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 23.

42. Вамболь, В. В. Разработка конструкции термохимического газогенератора с плазменным дожиганием [Текст] / В. Ш. Эрсмамбетов, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ, 2013. – С. 135.

43. Вамболь, В. В. Разработка плазменного газогенератора установки для утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / В. Ш. Эрсмамбетов, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ, 2013. – С. 134.

44. Вамболь, В. В. Раннее обнаружение несанкционированных мест складирования отходов, как способ предупреждения техногенных ЧС [Текст] / В. В. Вамболь, С. С. Зинченко // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых – Минск, 2015. – С. 29.

45. Вамболь, В. В. Системный подход к процессу утилизации опасных и твердых бытовых отходов [Текст] / В. В. Вамболь, В. М. Кобрин, М. В. Нечипорук // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2014: всеукр. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ, – 2014. – С. 16.

46. Вамболь, В. В. Снижение уровня диоксидов при утилизации отходов [Текст] / В. В. Вамболь // Проблемы безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: всерос. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС, 2014. – С. 175–177.

47. Вамболь, В. В. Способ раннего обнаружения несанкционированных мест складирования отходов [Текст] / В. В. Вамболь, С. С. Зинченко // Роль местной противовоздушной обороны и пожарной охраны в годы великой отечественной войны: междунар. науч.-практ. конф., 27 марта 2015. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2015. – С. 84–88.

48. Вамболь, В. В. Утилизация авиационной техники и охрана окружающей среды [Текст] / Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь, Н. В. Кобрин // Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України: II Всеукр. науч.-практ. конф. – Запоріжжя, 2006. – С. 92–94.

49. Вамболь, В. В. Численное моделирование процесса охлаждения генераторного газа установки утилизации твердых бытовых и опасных отходов [Текст] / В. В. Вамболь, В. Е. Костюк, Е. И. Кириладзе // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Вып. 66. – Х., 2014. – С. 178–187.

50. Вамболь, В. В. Экологически чистая переработка отходов с последующим метанированием продуктов плазменной газификации [Текст] / В. В. Вамболь, А. С. Чубенко // Проблемы техносферной безопасности: междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, 8 апреля 2014. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 230–232.

51. Вамболь, В. В. Экологический мониторинг малых предприятий [Текст] / В. В. Вамболь, В. Н. Кобрин, А. В. Овчаров // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій: міжвуз. науч.-практ. конф. – Х.: НУЦЗУ, 2011. – С. 40–41.

52. Вамболь, В. В. Энергетический анализ усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов [Текст] / В. В. Вамболь // Екологічна безпека. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 2/2015 (20). – С. 63–68.

53. Вамболь, С. А. Исследование численным методом процесса постановки дисперсной водяной завесы в системах управления экологической безопасности / С. А. Вамболь // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : зб. наук. ст. у 2 т. – Т. 2 / УкрНДП. – Х. : Райдер, 2012. – С. 154–159.

54. Вамболь, С. А. Математическое моделирование дисперсной фазы процесса установки водных завес в системах управления экологической безопасности [Текст] / С. А. Вамболь // Екологічна безпека. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2/2012 (14). – С. 73–76.

55. Вамболь, С. А. Моделирование газовой фазы процесса установки дисперсных водных завес в системах управления экологической безопасности [Текст] / С. А. Вамболь // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського : зб. наук. праць – № 6/2012 (77). – Кременчук: КрНУ, 2012 – С. 91–93.

56. Вамболь, С. А. Обеспечение экологической безопасности при утилизации РДТТ [Текст] / С. А. Вамболь, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2007. – С. 27–28.

57. Ветрова, Н. М. Эволюция теоретических подходов к управлению экологической безопасностью [Текст] / Н. М. Ветрова // Вісн. НУВГП. – 2007. – Вип. 1(37). – С. 3–9.

58. Винг Цанг. Распад и образование диоксида при горении отходов [Текст] / Винг Цанг // Химическая физика. – 1994. – Т. 13. – № 2. – С. 17–33.

59. Вихарева, Е. В. Непригодные к использованию лекарственные средства: научно-методологические основы: дис. ... д-ра техн. наук: 15.00.01;

защищена 27.01.09; утв. 18.04.09 / Вихарева, Елена Владимировна. – Пермь, 2009. – 301 с.

60. Влияние воздушной плазмы в процессе газификации твердых отходов на содержание конденсирующихся органических веществ в синтез-газе [Текст] / В. А. Кузнецов, Ю. А. Кучина., А. С. Лернер // Успехи прикладной физики. – М.: АО «НПО «Орион». – 2013. – Т. 1. – № 4. – С. 58–69.

61. Волков, Е. Б. Жидкостные ракетные двигатели [Текст] / Е. Б. Волков, Л. Г. Головков, Т. А. Сырицын. – М. : Воениздат, 1970. – 592 с.

62. Вторичные ресурсы: проблемы, перспективы, технология, экономика [Текст]: учеб. пособие / Г. К. Лобачев, В. Ф. Желтобрюхов. – Волгоград, 1999. – 180 с.

63. Герасимчук, З. В. Екологічна безпека регіону [Текст] / З. В. Герасимчук, А. О. Олексюк. – Луцьк : Надстир'я, 2007. – 280 с.

64. Гічка, М. М. Наукове обґрунтування використання методів дистанційного зондування в моніторингу ґрунтів: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.01.03 / Гічка Максим Миколайович; Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського. – Х., 2007. – 191 с.

65. Гнатушенко, В. В. Використання знімків надвисокого просторового розрізнення при моніторингу змін об'єктів земної поверхні [Текст] / В. В. Гнатушенко // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2010. – Вип. 26. – С. 14–19.

66. Горлицкий, Проблемы нормативно-правового регулирования обращения с отходами потребления [Текст] / Б. А. Горлицкий // Проблемы сбора, переработки и утилизации отходов. – 2003. – С. 74–77.

67. Горстко, А. Б. Введение в моделирование эколого-экономических систем [Текст] / А. Б. Горстко, Г. А. Угольницкий. – Ростов н/Д. : Рост. гос. ун-т, 1990. – 112 с.

68. Гошовский, С. В. Екологічна безпека техноприродних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком неологічних процесів [Текст] /

С. В. Гошовский, Г. И. Рудько, Б. М. Преснер. – К. : ЗАТ «НІЧЛАВА», 2002. – 624 с.

69. Гречко, А. В. Региональный характер проблемы твердых бытовых и промышленных отходов и ее решение пирометаллургическим методом [Текст] / А. В. Гречко, В. Ф. Беннисов, Л. А. Федоров // Экология и промышленность России. - 1997. - №10. - С. 13-16.,

70. Грузинский, Д. Медицинские отходы нуждаются в утилизации [Электронный ресурс] // Д. Грузинский, Е. Брынза, В. Самченко. – К.: Подробности, 8.10.201. – Режим доступа: <http://podrobnosti.ua/796531-meditsinskie-othody-nuzhdajutsja-v-utilizatsii.html>.

71. ДБН А.2.2-1–2003. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. – К.: Держбуд України, 2004. – 23 с.

72. ДБН В.2.4-2–2005. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. – К.: Держбуд України, 2005. – 31 с.

73. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять. - [Чинний від 01.10.2007]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – III. –12 с. – (Національний стандарт України).

74. Дога, В. С. Экономическая оценка технологического процесса усовершенствованной технологии плазменной газификации отходов [Текст] / В. С. Дога, В. В. Вамболь // Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки: міжнар. наук.-практ. конф. – Х.: НУЦЗУ, 2015. – С. 92–93.

75. Дога, В. С. Экономический анализ усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов [Текст] / В. С. Дога, В. В. Вамболь // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць – № 5/2015 (94). – Кременчук : КрНУ, 2015. – С. 136–141.

76. Доманська, М. В. Ідентифікація несанкціонованих звалищ побутових відходів за матеріалами ДЗЗ [Текст] / М. В. Доманська, С. П. Боднар // Часопис картографії. – 2013. – Вип. 7. – С. 114–126.

77. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Харківській області у 2014 році [Електронний ресурс] // Департамент екології та природних ресурсів Харківської області. – Режим доступу: <http://ecodepart.kh.gov.ua/diialnist/dopovid-pro-stand-navkolyshnoho-seredovysha-ptyrodnoho-seredovyshcha-v-kharkivskii-oblasti-u-2012-rotsi>.

78. Дроздова, Т. В. Полигон по захоронению твердых бытовых отходов как модель по изучению многосредового и комплексного воздействия на окружающую среду и здоровье населения : дис. ... канд. мед. наук : 14.00.07 / Дроздова Татьяна Владимировна; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московская медицинская академия». – М., 2004. – 155 с.

79. ДСанПіН 2.2.7.029–99. Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення : затв. Постановою Головного державного санітарного лікаря України від 7 січня 1999 р. № 29. – К.: Держбуд України, 1999. – 27 с.

80. ДСТУ 3910–99 (ГОСТ 17.9.1.1–99). Охорона природи. Поводження з відходами. Класифікація відходів. Порядок найменування за генетичним принципом і віднесення їх до класифікаційних категорій. – Чинний з 2001-01-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2001. – 40 с.

81. ДСТУ 3911–99 (ГОСТ 17.9.0.1–99). Охорона природи. Поводження з відходами. Виявлення відходів і подання інформаційних даних про відходи. Загальні вимоги. – Чинний з 2001-01-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2001. – 11 с.

82. ДСТУ 4462.0.01:2005. Охорона природи. Поводження з відходами. Терміни та визначення понять. – Чинний з 2006-07-01. – К.: Держспожив-стандарт України, 2006. – 20 с.

83. ДСТУ 4462.0.02:2005. Охорона природи. Комплекс стандартів у сфері поводження з відходами. – Чинний з 2006-07-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 11 с.

84. Екологічна безпека, природно-техногенна безпека і цивільний захист в Україні [Текст]: навч. посіб. / В. М. Кобрін, П. М. Куліков, М. В. Нечипорук та ін.; Мін-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Х. : Нац. аерокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 406 с.

85. Європа в цифрах [Текст] / Під ред. Г. Шефер // Річник Євростата 2006 – 2007 рр. – 371 с.

86. Застосування сучасних інформаційних технологій для досліджень екологічного стану Шацьких озер [Текст] / В. І. Клименко та ін. // Екологічна безпека та природокористування. – 2010. – № 6. – С. 103–122.

87. Зеркалов, Д. В. Екологічна безпека: управління, моніторинг, контроль : посібник [Текст] / Д. В. Зеркалов. – К.: Основа, 2007. – 412 с.

88. Зеркалов, Д. В. Экологическая безопасность [Текст]: учеб. пособие / Д. В. Зеркалов. – К.: Основа, 2009. – 513 с.

89. Измалков, В. И. Экологическая безопасность, методология прогнозирования антропогенных загрязнений и основы построения химического мониторинга окружающей среды [Текст] / В. И. Измалков. – С.-Пб. : Наука, 1994. – 131 с.

90. Инженерная защита для окружающей среды [Текст]: учеб. пособие / под ред. О. Г. Воробьева. – С.-Пб. : Лань, 2002. – 288 с.

91. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст]: учеб. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

92. Кадерлеев, М. К. Технология плазменной газификации Westinghouse Plasma Corporation [Электронный ресурс] / М. К. Кадерлеев. – Режим доступа: http://www.cleandex.ru/articles/2011/07/27/zavody_po_pererabotke_othodov_proizvodstva_i_potrebleniya_v_elektroenergiyu.

93. Калінін, Н. Ю. Розпізнавання структури кольорових фотограмметричних зображень земної поверхні за спектральними і структурними ознаками [Текст] / Н. Ю. Калініна // Праці ТДАТУ. – 2013. – Вип. 4. – Т. 53. – С. 66–71.

94. Канторович, Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива [Текст] / Б.В. Канторович. – М.: Книга по требованию, 1958. – 596 с.

95. Каралюнец, А. В. Основы инженерной экологии. Обращение с отходами производства и потребления [Текст]: учеб. пособие / А. В. Каралюнец, Т. Н. Маслова, В. Т. Медведев. – М.: МЭИ, 2000. – 104 с.

96. Касимов, А. М. Современное состояние проблемы образования и накопления промышленных отходов в Украине [Текст] / А. М. Касимов // Экология и промышленность. – Х., 2007. – № 2. – С. 46–51.

97. Касимов, А. М. Современные методы контроля загрязнения атмосферного воздуха при управлении техногенной безопасностью на региональном уровне [Текст] / А. М. Касимов, В. М. Шмандий, А. Н. Кучук // Б-ка журн. ІТЕ. – Х. : КДПУ. – 2001. – № 3. – 136 с.

98. Качинский, А. Б. Екологічна безпека України: аналіз, оцінка та державна політика [Текст] / А. Б. Качинский, Т. А. Хміль. – К.: НІСД, 1997. – 127 с.

99. Качинський, А. Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращання [Текст] / А. Б. Качинський. – К. : НІСД, 2001. – 312 с.

100. Класифікатор відходів (КВ): ДК 005 : затв. Держстандартом 29.02.96. – К.: Держспоживстандарт України, 1996. – 52 с.

101. Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. – [Действующий от 2002-01-01]. – Иркутск, М.: ООО «Фирма АКИМ», 2002. – 53 с.

102. Клименко, В. І. Сучасні інформаційні технології для екологічної безпеки ґрунтів [Текст] / В. І. Клименко. – К.: Азимут-Україна, 2012. – 120 с.

103. Кобрин, В. Н. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов [Текст] / В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Екологічна безпека. – Кременчук: КрНУ, 2014. – 2/2014 (18). – С. 25–30.

104. Козка, А. Правовое регулирование обращения отходов в Украине [Электронный ресурс] / А. Козка // Экология предприятия. – № 4. – К.: Видавничий дім МЕДІА-ПРО, 2013. – Режим доступа: <http://ecologia.com/content/pravovoe-regulirovanie-obrashcheniya-othodov-v-ukraine>.

105. Колядинський, М. І. Екологічна небезпека твердих побутових відходів [Текст] / М. І. Колядинський, Я. О. Мольчак, І. Я. Мисковець // Сучасні проблеми збалансованого природокористування: зб. наук пр ПДАТУ. – Кам'янець-Подільський, 2011. – С. 42–45.

106. Кондратенко, А. Н. Функции системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок [Текст] / А. Н. Кондратенко, С. А. Вамболь, В. В. Вамболь // Науковий вісник ХНАДУ – Х.: ХНАДУ, 2015. – Вип. 69. – С. 95–100.

107. Корепанов, М. А. Математическое моделирование процессов переработки полимерных промышленных отходов (Mathematical modeling of processes of polymeric industrial wastes high temperature reprocessing) [Текст] / М. А. Корепанов, С. Н. Храмов // Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды – ПООС-95: тез. докл. Междунар. конф. (Томск, 12 – 16 сентября 1995 г.). – Томск, 1995. – С. 116.

108. Корепанов, М. А. Математическое моделирование процессов термической переработки элементов РДДТ: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02; защищена 27.02.98; утв. 15.05.98 / Корепанов Михаил Александрович. – Ижевск, 1998. – 162 с.

109. Косовцев, В. О. Національна безпека України: проблеми та шляхи реалізації пріоритетних національних інтересів [Текст] / В. О. Косовцев, І. Ф. Бінько. – К.: НІСД, 1996. – 61 с.

110. Костюк, В. Е. К выбору аппроксимирующего выражения для коэффициента аэродинамического сопротивления капли [Текст] / В. Е. Костюк // Науч.-метод. материалы по теории авиационных двигателей: сб. науч. тр. – Х.: ХВВАИУ, 1988. – Вып. 6. – С. 13–21.

111. Кохан, С. С. Оцінка можливості ідентифікації звалищ за багатоспектральними космічними знімками [Текст] / С. С. Кохан, А. А. Москаленко // Вісник геодезії та картографії. – 2009. – № 6. – С. 29–34.

112. Красовский, Г. Я. Введение в методы космического мониторинга окружающей среды [Текст] / Г. Я. Красовский, В. А. Петросов. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 1999. – 205 с.

113. Кузнецов, В. А. Исследование воздушно-плазменной газификации биомассы по обращенной схеме: автореф. ... канд. техн. наук: 01.04.13; защищена 22.02.11; увр. 03.06.011 / Кузнецов Вадим Алексеевич. – СПб., 2011. – 132 с.

114. Кулиниченко, В. Р. Справочник по теплообменным расчетам [Текст] / В. Р. Кулиниченко. – К.: Тэхника, 1990. – 166 с.

115. Лаврик, В. І. Методи математичного моделювання в екології [Текст] / В. І. Лаврик. – К.: Фітосоціоцентр, 1998. – 131 с.

116. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.

117. Липенков, А. Д. Безопасное развитие как повышение организованности эколого-экономических систем [Текст] / А. Д. Липенков // Проблемы экономики и управления. – 2004. – № 1. – С. 248–258.

118. Лозанський, В. Р. Екологічне управління в розвинутих країнах світу у порівнянні з Україною [Текст] / В. Р. Лозанський. – Х. : УкрНДІЕП, 2000. – 68 с.

119. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

120. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1978. – 736 с.

121. Мартыненко, О. Г. Справочник по теплообменникам [Текст]: в 2-х т. / Под ред. О. Г. Мартыненко. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 560 с.
122. Масленникова, И. В. Управление экологической безопасностью [Текст] / И. В. Масленникова. – С.-Пб. : СПбУ, 2001. – 130 с.
123. Медичні відходи несуть небезпеку [Електронний ресурс] // Департаменті екології та природних ресурсів Львівської області. – Режим доступа: http://www.ekologia.lviv.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=1926&Itemid=87.
124. Методологический подход к построению системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок [Текст] / С. А. Вамболь, А. П. Строков, В. В. Вамболь, А. Н. Кондратенко // Двигатели внутреннего сгорания : науч.-техн. журнал. – Х., НТУ «ХП», 2015. – № 1. – С. 48–52.
125. Милош, В. В. Диоксины и их потенциальная опасность в экосистеме «человек – окружающая среда» [Электронный ресурс] / В. В. Милош. – Режим доступа: <http://crowngold.narod.ru/articles/dioxini.htm>.
126. Михайленко, В. П. Особенности образования твердых бытовых отходов в Украине [Электронный ресурс] / В. П. Михайленко, И. Л. Алексеевец, Г. Денафас. – Режим доступа: <http://waste.ua/eco/2012/municipal-waste/ukraine/>.
127. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
128. Моделирование процесса плазменной газификации опасных и вредных отходов [Электронный ресурс] / С. В. Петров, С. Г. Бондаренко, Е. Г. Дидык, А. А. Дидык // Институт газа НАН Украины, НТУУ «КПИ». — Режим доступа: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/modeling.pdf>.
129. Моделирование течения парожидкостной смеси в сопле струйного аппарата (заключ.) / Харьковский авиационный институт им. Н. Е. Жуковского. – Х., 1988. – 83 с. – № ГР 01.86.0136238. – Инв. № 28.80024337.

130. Можливості застосування ГІС і ДЗЗ для оцінки потенційних еколого-економічних збитків від місць видалення відходів [Текст] / Н. А. Новохацька, О. Г. Рогожин, В. О. Трофимчук // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій: міжнар. наук.-практ. конф. – К.-Х.-АР Крим, 2013. – С. 158–165.

131. Монтаг, П. США: захоронения отходов опасны [Текст] / П. Монтаг // Проблемы химической безопасности. – 1991. – № 312. – С. 122-146.

132. Монганг, П. Опасно ли жить возле свалки? [Текст] / П. Монганг // Проблемы химической безопасности. – 1991. – № 274. – С. 89–94.

133. Моссэ, А. Л. Переработка медико-биологических отходов в плазме [Текст] / А. Л. Моссэ, А. В. Горбунов, Б. В. Савчин // Чистый город. – 2006. – № 2. – С. 5–7.

134. Моссэ, А. Л. Переработка упаковки с помощью термической плазмы [Текст] / А. Л. Моссэ, В. В. Савчин, А. В. Ложечник // Твердые бытовые отходы: науч.-практ. журн. – 2008. – № 1. – С. 36–38. – Режим доступа: <http://www.solidwaste.ru/magazine/archive/shownumber/2008/1.html>.

135. Моссэ, А. Л. Плазмотермическая обработка токсичных отходов [Текст] / А. Л. Моссэ, В. В. Савчин // Твердые бытовые отходы. – 2006. – № 12. – С. 22–24.

136. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2012 р. [Текст]. – К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, 2013. – 416 с.

137. Національна доповідь про стан навколишнього середовища в Україні у 1999 році [Текст] / Міністерство екології та природних ресурсів України. – К.: Вид-во Раєвського, 2000. – 184 с.

138. Некос, В. Ю. Основи загальної та глобальної неоекології [Текст] : навч. посіб.: у 2 ч. / В. Ю. Некос. – Х. : Прапор, 2001. – Ч. 2. – 287 с.

139. Нечипорук, Н. В. Альтернативная технология утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / Н. В. Нечипорук, В. Ш. Эрсамбетов // Екологічна безпека. – Кременчуг: КрНУ, 2012. – Вып. 2/2012 (14). – С. 80–84.

140. Нечипорук, Н. В. Математическое описание разделения многокомпонентных газовых смесей, полученных при газификации отходов [Текст] / Н. В. Нечипорук, Ю. В. Шахов, В. В. Вамболь // Проблеми екологічної безпеки: XIII міжнар. наук.-техн. конф. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 27.

141. Нечипорук, Н. В. Об утилизации авиационной техники [Текст] / Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь, Н. В. Кобрина // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2006: міжнар. наук.-техн. конф. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т. – 2006. – С. 40.

142. Нечипорук, Н. В. Технологические устройства высокотемпературного пиролиза для систем управления экологической безопасностью [Текст] / Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки: міжнар. наук.-практ. конф. – Х.: НУЦЗУ, 2015. – С. 138–139.

143. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред [Текст] : в 2 т. / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – Т. 1. – 384 с.

144. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. [Текст] / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – Ч. 1. – 464 с.

145. Никитин, А. Т. Экология охрана природы, экологическая безопасность: учеб. пособие [Текст] / А. Т. Никитин, С. А. Степанов. – М. : ММНЭПу, 2000. – 648 с.

146. Новохацька, Н. А. Комплексна оцінка та прогнозування впливу сміттєзвалищ на складові довкілля: автореф. дис. к-та техн. наук: 21.06.01 / Новохацька Наталя Анатоліївна; Київський національний університет будівництва і архітектури. – К., 2015. – 22 с.

147. Новохацька, Н. А. Методологія просторового моделювання зони забруднення навколо місць видалення відходів [Текст] / Н. А Новохацька // Екологічна безпека та природокористування. – 2014. – № 15. – С. 53–60.

148. Новохацька, Н. А. Моделювання екологічних ситуацій навколо місць видалення відходів [Текст] / Н. А Новохацька, О. М. Трофимчук // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій: міжнар. наук.-практ. конф. – К., 2014. – С. 13–16.

149. Новохацька, Н. А. Моделювання та прогнозування впливу сміттєзвалищ на підземні води [Текст] / Н. А. Новохацька, Д. Л. Крета // Екологічні науки: наук.-практ. журнал. – 2015. – № 1/2015(7). – С. 71–79.

150. Новохацька, Н. А. Технологія інвентаризації місць видалення відходів методами дистанційного зондування Землі [Текст] / Н. А. Новохацька, О. М. Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування. – 2014. – № 14. – С. 31–40.

151. Об утверждении Правил проведения утилизации и уничтожения некачественных лекарственных средств, в состав которых входят наркотические средства, психотропные вещества и прекурсоры: приказ мин-ва здравоохранения Украины, мин-ва охраны окружающей природной среды и ядерной безопасности Украины от 19 марта 1999 г. №67/59 // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 1999. – № 36 – 37. – С. 137.

152. Обзор квалификационных требований. Технология плазменной газификации Westinghouse [Электронный ресурс]. – авг. 2014. – 57 с. – Режим доступа: http://www.westinghouse-plasma.com/wp-content/uploads/2014/09/WP_SoQ_August_2014_NO_NDA_Required_RU.pdf.

153. Баран, Л. Область придбала прилад для утилізації медичних відходів [Електронний ресурс] / Л. Баран. – Режим доступа: <http://www.galka.if.ua/oblast-pridbala-prilad-dlya-utilizatsiyi-medichnih-vidhodiv/>.

154. Овчинникова, Г. П. Рециклинг вторичных полимеров [Текст]: учеб. пособие. – Саратов, 2000. – С. 21.

155. Одес, В. И. Вторичные ресурсы: хозяйственный механизм использования [Текст]. – М., 1988. – 15 с.

156. Орешкина, Л. В. Обнаружение и распознавание класса объектов на многозональных изображениях дистанционного зондирования [Текст] / Л. В. Орешкина // Информатика. – 2005. – № 2. – С.79–85.

157. Орлов, А. И. Проблемы управления экологической безопасностью [Текст] / А. И. Орлов, В. Н. Федосеев // Менеджмент в России и за рубежом. – М., 2000. – № 6. – С. 22–29.

158. Орлова, Т. О. Оцінки екологічного стану земельних ділянок, зайнятих відходами та об'єктами поводження з ними: дис. ... канд. техн. наук : 05.24.04 / Орлова Тетяна Олександрівна; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – К., 2008. – 140 с.

159. Основы построения РЛС [Текст] / В. П. Блохин, Б. Ф. Бондаренко, В. Т. Неснов, В. Е. Угольников. – К.: КВИРТУ ПВО, 1987. – 368 с.

160. Особенности образования твердых бытовых отходов в Украине [Электронный ресурс] / В. П. Михайленко, И. Л. Алексеевец, Г. Денафас и др. // Твердые бытовые отходы. Утилизация и рециклинг. Полигоны. – 2012. – Режим доступа: <http://waste.ua/eco/2012/municipal-waste/ukraine/>.

161. Павленко, М. Медицинские отходы в Украине: как утилизировать? [Электронный ресурс] // Медицинский новостной портал МЕДФАРМ-КОННЕКТ, 2011. – Режим доступа: http://medpharmconnect.com/Education_and_career/Articles/6697.htm.

162. Пажи, Д. Г. Распылители жидкостей [Текст] / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М. : Химия, 1979. – 216 с.

163. Парфенюк, А. С. Крупномасштабная комплексная переработка твердых углеродистых промышленных и бытовых отходов [Текст] / А. С. Парфенюк // Кокс и химия. – 2001. – № 5. – С. 41–44.

164. Парфенюк, А. С. Новый агрегат для переработки твердых отходов [Текст] / А. С. Парфенюк // Кокс и химия. – 1999. – № 2. – С. 35 – 37.

165. Парфенюк, А. С. Получение твердого топлива из смесей твердых углеродистых промышленных и бытовых отходов [Текст] / А. С. Парфенюк, С. И. Антонюк // Кокс и химия. – 2001. – № 5. – С. 44–47.

166. Пат. 14937 Респ. Беларусь, МПК6 А 61L 11/00, F 23G 5/00, F 23G 7/00, F 24C 14/02, G 21F 9/00. Способ переработки медицинских и/или биологических отходов в термической плазме (варианты) и устройство для его осуществления / Савчин В. В.; Моссэ А. Л.; Ложечник А. В.; Заявитель Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» – № а20090789; заявл. 29.05.09; опубл. 30.10.11, Афіцыйны бюл. № 5(82). – 79 с.

167. Пат. 2320038 Российская Федерация, МПК G21F9/00. Способ и установка для переработки радиоактивных отходов / Арустамов А. Э., Васендин Д. Р., Горбунов В. А. и др. – Заявл. 18.11.05; опубл. 20.03.08., Бюл. № 8. – 5 с.: ил.

168. Пат. 2504443 Российская Федерация, МПК В09В3/00. Уничтожение твердых отходов или переработка их в нечто полезное или безвредное / Артемов А. В., Крутяков Ю. А., Кулыгин В. М. и др. – Заявл. 30.11.12; опубл. 20.01.14., Бюл. № 6. – 4 с.

169. Пат. 4519U Респ. Беларусь, МПК (2006) В 23В 3/00. Плазмохимическая установка для синтеза углеродного наноматериала / Бублиевский А. Ф.; Горбунов А. В.; Долголенко Г. В. и др.; Заявители Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси». – № u20070890; заявл. 14.12.07; опубл. 30.08.08, Афіцыйны бюл. № 4(63). – 72 с.

170. Пат. 96684 Україна, МПК F23G 5/027 (2006.01). Спосіб утилізації твердих відходів виробництва / Нечипорук М. В.; Вамболь В. В.; Ерсмабетов В. Ш. та ін.; Заявник і патентоволодар Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – № а201008094; заявл. 29.06.10; опубл. 25.11.11, Бюл. № 22. – 3 с.: ил.

171. Переработка медицинских и биологических отходов плазменными методами / А. Л. Моссэ, В. В. Савчин и др. // Чистый город. – М., 2011. – № 4. – С. 3–6.

172. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов [Текст] / Б. Е. Патон, А. В. Чернец, Г. С. Маринский, С. В. Петров // Современная электро-металлургия. – К., 2005. – № 3. – С. 54–63.

173. Плазменная газификация биомассы на примере отходов древесины [Текст] / А. Н. Братцев, В. А. Кузнецов, В. Е. Попов, А. А. Уфимцев // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49. – № 2. – С. 251–255.

174. Плазменно-дуговая технология получения синтез-газа из жидких отходов [Электронный ресурс] / С. В. Петров, В. Н. Коржик, Г. С. Маринский, А. В. Чернец. – Режим доступа: http://plazer.com.ua/docs/pdf/gas_sintez.pdf.

175. Попов, А. Г. Тепловое ограждение нагревательных и термических печей : учеб. пособие [Текст] / А. Г. Попов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 31 с.

176. Попов, М. А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях [Текст] / М. А. Попов // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 1. – С. 97–103.

177. Применение паро-плазменного процесса для пиролиза органических, в том числе медицинских и других опасных отходов [Электронный ресурс] / С. В. Петров, Г. С. Маринский, А. В. Чернец, и др. – Режим доступа: http://plazer.com.ua/docs/pdf/paro_plazm_process.pdf.

178. Применение плазменной газификации в процессе утилизации композиционных материалов, используемых в авиационной технике [Текст] / Н. В. Нечипорук, С. А. Вамболь, В. Н. Кобрин и др. // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності: зб. наук. пр. – 2008. – № 2. – С. 159–163.

179. Природна та техногенна безпека геосферного простору у зв'язку з розвитком небезпечних природних, техноприродних і техногенних процесів

[Текст] / Г. І. Рудько, І. М. Ольшанська, Н. О. Шевченко, В. П. Медвідь // Техногенно-екологічна безпека як умова сталого розвитку України: наук.-практ. конф. – К.: Знання. – 2002. – С. 183–187.

180. Про відходи: Закон України від 5 берез.1998 р. № 187/98 // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 1998. – № 36 – 37. – С. 242.

181. Про забезпечення населення якісними та доступними лікарськими засобами: рішення РНБО від 25 травня 2012 р. – К.: Указ Президента України від 30.08.2012 р. №526/2012.

182. Проблема создания промышленных агрегатов для твердых углеродистых отходов. Возможности ее решения [Текст] / А. С. Парфенюк, С. П. Веретельник, И. В. Кутняшенко и др. // Кокс и химия. – 2001. – № 3. – С. 40–44.

183. Промышленные отходы. Проблемы и решения. Технологии и оборудование [Текст] : учеб. пособие / А. М. Касимов, В. Т. Семенов, А. А. Романовский и др. – Х. : ХНАМГ, 2007. – 410 с.

184. Процесс «Плазер» плазменно-паровой переработки отходов [Электронный ресурс] / В. Н. Коржик, Г. С. Маринский, В. Н. Орлик, С. В. Петров. – Режим доступа: http://plazer.com.ua/docs/pdf/process_plazer.pdf.

185. Пчелкин, Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / Ю. М. Пчелкин. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

186. Разработка технологии получения альтернативных видов топливопродуктов с использованием плазменной обработки медико-биологических и токсичных отходов [Текст] / Н. В. Нечипорук, В. Н. Кобрин, В. Ш. Эрсамбетов, В. В. Вамболь // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ, 2012. – С. 140.

187. Распыливание жидкостей [Текст] / Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, Б. В. Новиков, В. И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

188. Рахимо, М. А. Проблемы утилизации полимерных отходов [Электронный ресурс] / М. А. Рахимов, Г. М. Рахимова, Е. М. Иманов // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 8-2. – С. 331 – 334. – Режим доступа: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10003822.

189. Реймерс, Н. Ф. Экология [Текст] / Н. Ф. Реймерс. – М.: Россия молодая, 1994. – 367 с.

190. Рынок и проблемы обращения с отходами в Украине. Экспресс – анализ [Электронный ресурс] – Режим доступа: tp://www.bionafta.com.ua/materialu/10.Runok_i_problemu_obraschenija_s_othodami_v_Ukraine.pdf.

191. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. [Текст]: монография / Т. Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.

192. Садеков, А. А. Экологический вызов и проблемы устойчивого развития [Текст] / А. А. Садеков // *Прометей: региональный сб. научн. тр. по экономике*. – Донецк, Институт экономико-правовых исследований НАН Украины. – 2004. – Вып. 14. – С. 18–24.

193. Сленкин, М. В. Образование диоксинов при термической утилизации твердых бытовых отходов [Электронный ресурс] / М. В. Сленкин, Н. М. Жовмир, К. А. Дрозд. – Режим доступа: <http://waste.ua/cooperation/2005/theses/slenkin.html>.

194. Стаскевич, Н. Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа [Текст] / Н. Л. Стаскевич, Г. Н. Северинец, Д. Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.

195. Стихийне сміттєзвалище у Броварському районі [Электронный ресурс] // Департамент екології та природних ресурсів Київської обласної державної адміністрації. – Режим доступа: <http://eko.koda.gov.ua/styhijne-smittyezvalyshhe-u-brovarskomu-rajoni/>.

196. Стратегічні напрямки переходу України на засади сталого розвитку в контексті її інтеграції до Європейського співтовариства; під ред. акад. НАН України Е. В. Соботовича. – К.: Салютіс, 2005. – 44 с.

197. Супруненко, О. Мусорная эра: от рассвета до заката [Электронный ресурс] // О. Супруненко. – Режим доступа: http://gazeta.zn.ua/ENVIRONMENT/musornaya_era_ot_rassveta_do_zakata.html.

198. Сучасні методи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок [Текст]: монографія / С. А. Вамболь, А. П. Строков, В. В. Вамболь, А. Н. Кондратенко. – Х.: НУЦЗУ, 2015. – 234 с.

199. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник; под общ. ред. В. А. Григорьева. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

200. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент [Текст]: справочник / Под общей ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

201. Теплопередача в двухфазном потоке [Текст] / Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.

202. Теплотехнический справочник [Текст] / под ред. В. Н. Юренева, Д. П. Лебедева. – М.: Энергоатомиздат, 1976. – Т. 2. – 896 с.

203. Термическая утилизация твердых бытовых отходов [Текст] / В. М. Батенин, В. И. Ковбасюк, Л. Г. Кретьова, Ю. В. Медведев // Теплоэнергетика. – М., 2011. – № 3. – С. 62–66.

204. Тикунов, В. И. Геоинформатика [Текст]: академический учебник / В. И. Тикунов. – М.: Академия, 2006. – 540 с.

205. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения [Текст] / Г. Уоллис. – М.: Мир, 1970. – 440 с.

206. Уоллис, Дж. Одномерные двухфазные течения [Текст]: пер. с англ. / Дж. Уоллис – М.: Мир, 1972. – 436 с.

207. Управление опасными промышленными отходами. Современные проблемы и решения [Текст]: монография / А. М. Касимов, Л. Л. Тобажнянский, В. И. Тошинский, Д. В. Сталинский. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 500 с.

208. Управление промышленными отходами [Текст]: учеб. пособие : в 2 кн. / А. М. Гриценко, Е. К. Макаровский, И. В. Черванев, И. А. Шеренков.– Кн. 1. – Ч. 1: Промышленные отходы и окружающая среда в современном мире. – Х.: РИП «Оригинал», 2000. – 80 с.

209. Установка для плазменной газификации различных видов отходов [Текст] / А. Н. Братцев, В. Е. Попов, А. Ф. Рутберг, С. В. Штенгель // Теплофизика высоких температур. – 2006. – Т. 44. – № 6. – С. 832–837.

210. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов [Текст] / А. С. Клинков, П. С. Беляев. – Тамбов: ТГТУ, 2010. – 100 с.

211. Утилизация летательных аппаратов [Текст]: монография / Н. В. Нечи-порук, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь, Е. А. Полищук. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – 304 с.

212. Утилизация медико-санитарных отходов. Документ по вопросам политики [Электронный ресурс]. – Женева: Департамент защиты окружающей человека среды, 2014. – Режим доступа: http://www.who.int/immunization_safety/publications/waste_management/Health_care_waste_management_policy_paper_russian.pdf?ua=1.

213. Утилизация медицинских отходов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ekolife.org.ua/utilizaciya-medicinskih-othodov.html>.

214. Утилизация органических, в том числе медицинских и других опасных отходов путем их пиролиза с применением паро- плазменного процесса «Плазер» [Электронный ресурс] / С. В. Петров, Г. С. Маринский, А. В. Чернец, В. Н. Коржик. – Режим доступа: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/utizization.pdf>.

215. Утилизация отходов методом плазменной газификации [Текст] / С. И. Планковский, Н. В. Нечипорук, В. Н. Кобрин и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 34. – Х., 2007. – С. 208–211.

216. Утилизация отходов методом плазменной газификации [Текст] / С. И. Планковский, В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – Вып. 34. – С. 208–211.

217. Утилизация элементов аэрокосмической техники, выполненных из композиционных материалов [Текст] / С. И. Планковский, Н. В. Кобрин, В. В. Вамболь // Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України: II всеукр. наук.-практ. конф. – Запоріжжя, 2006. – С. 95–97.

218. Федоров, Л. А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы [Текст] / Л. А. Федоров. – М.: Наука, 1993. – 266 с.

219. Федоровский, А. Д. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа [Текст] / А. Д. Федоровский // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т. 8. – № 2/3. – С. 76–83.

220. Физико-химические процессы в газовой динамике [Текст]: компьютеризованный справ. в 3 т.; под ред. Г. Г. Черного и С. А. Лосева. – М.: Науч.-изд. центр механики. – 2002. – Т. 2.: Физико-химическая кинетика и термодинамика. – 368 с.

221. Фірма з утилізації медичних відходів з'явиться у Львові [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://varianty.lviv.ua/7534-firma-z-utyilizatsii-medychnykh-vidkhodiv-ziavytsia-u-lvovi>.

222. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст] / К. Флетчер – М.: Мир, 1991. – Т. 1. – 504 с.

223. Хавкин, Ю. И. Центробежные форсунки [Текст] // Ю. И. Хавкин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 168 с.

224. Хван, Т. А. Промышленная экология [Текст] / Т. А. Хван – Ростов/нД.: Феникс, 2003. – 320 с.

225. Хлобыстов, Е. В. Методологические аспекты оценки эколого-экономической безопасности промышленного комплекса [Текст] /

Е. В. Хлобыстов, Ю. В. Кобзарь, И. В. Патока // Планирование экономического развития регионов с учетом их экологической безопасности.: материалы науч.-практ. Семинара. – К. : 1995. – С. 53 – 59.

226. Хьюитт, Дж. Кольцевые двухфазные течения [Текст] / Дж. Хьюитт, Н. Холл-Тэйлор. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.

227. Черняховский, Э. Р. Управление экологической безопасностью: учебно-практ. пособие [Текст] / Э. Р. Черняховский – М.: Альфа-Пресс, 2007. – 248 с.

228. Численное моделирование формирования водяной струи однофазных распылительных устройств [Текст] / С. А. Вамболь, В. Ш. Эрсмамбетов, Н. В. Кобрина, О. А. Трухмаев // Вестн. Кременчуг. Нац. ун-та. – Вып. 1/2012(72). – Кременчуг: КрНУ, 2012. – С. 161–163.

229. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

230. Чубенко, А. С. Экологически чистая утилизация отходов жизнедеятельности [Текст] / А. С. Чубенко, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 62. – Х., 2013. – С. 98–102.

231. Шахов, Ю. В. Математическая модель энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей [Текст] / Ю. В. Шахов, И. И. Петухов, В. В. Вамболь // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. пр. – Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 41(1150). – С. 134–139.

232. Шевчук, В. Я. Екологічне управління [Текст] : підручник / В. Я. Шевчук, Ю. М. Саталкін, Г.О. Білявський. – К.: Либідь, 2004. – 432 с.

233. Шенг, Дж. С. Обзор численных методов решения уравнений Навье-Стокса для течений сжимаемого газа [Текст] / Дж. С. Шенг // Аэрокосмическая техника. – 1986.– № 2. – С. 65–92.

234. Шервуд, Т. Массопередача [Текст] / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки. – М.: Машиностроение, 1988. – 600 с.
235. Шмандий, В. М. Дистанционное зондирование земли в системе управления экологической безопасностью [Текст] / В. М. Шмандий, В. В. Вамболь, С. А. Вамболь // Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки: міжнар. наук.-практ. конф. – Х.: НУЦЗУ, 2015. – С. 96–97.
236. Шмандий, В. М. Дистанционное зондирование и методы математического моделирования в задаче мониторинга несанкционированных мест скопления отходов [Текст] / В. М. Шмандий, С. А. Вамболь, В. В. Вамболь // Проблемы екологічної безпеки: XIII міжнар. наук.-техн. конф. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 15.
237. Шмандий, В. М. Системный подход к решению задачи управления экологической безопасностью при утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / В. М. Шмандий, В. В. Вамболь // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: междунар. науч. экологич. конф. – Краснодар, Кубанский госагроуниверситет. – 2015. – Ч. 2. – С. 680–685.
238. Шмандий, В. М. Теоретические и практические основы управления техногенной безопасностью на региональном уровне [Текст] / В. М. Шмандий // Захист довкілля від антропогенного навантаження. – Вип. 4(6). – Кременчук, 2001. – С. 95–100.
239. Шмандий, В. М. Управление техногенной безопасностью урбосистемы на стадии образования и поступления отходов в окружающую среду [Текст]: монография / В. М. Шмандий. – Х., 2001. – 152 с.
240. Шмандий, В. М. Управление экологической безопасностью на региональном уровне: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01; защищена 22.01.04; увр. 14.04.04 / Шмандий Владимир Михайлович. – Х., 2003. – 381 с.
241. Шмандий, В. М. Екологічна безпека [Текст]: підручник / В. М. Шмандий, В. Ю. Некос. – Х.: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2008. – 436 с.

242. Шмандій, В. М. Практичні основи розробки комплексної системи заходів по управлінню техногенною безпекою в техногенно навантаженому регіоні [Текст] / В. М. Шмандій // Вісн. НТУ «ХПІ». – 2002. – № 20. – С. 217–221.

243. Экологи: На каждого украинца приходится 750 тонн мусора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://korrespondent.net/ukraine/1599674-ekologi-na-kazhdogo-ukrainca-prihoditsya-750-tonn-musora>.

244. Экологическая безопасность, устойчивое развитие и природоохранные проблемы [Текст] / под ред. К. Ф. Фролова. – М.: Знание, 1999. – 704 с.

245. Экологические аспекты утилизации отходов [Текст] / В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь, Н. В. Нечипорук и др. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. – Х.: ХАІ. – 2007. – С. 88.

246. Экологический аспект плазменной переработки твердых отходов [Текст] / А. В. Артемов, А. В. Переславцев, Ю. А. Крутяков и др. // Экология и промышленность России. – 2011. – Сент. – С. 20 – 23. – Режим доступа: <http://www.kalvis.ru/katalog-izdanij/zhurnalyi/ekologiya-i-promyshlennost-rossii/archiv/2011/%E2%84%969.html>.

247. Экология, охрана окружающей среды, экологическая безопасность [Текст]: учеб. пособие / под общ. Ред. А. Т. Никитина, С. А. Степанова. – М.: 2000. – 648 с.

248. Экология, охрана природы, экологическая безопасность [Текст] / под ред. В. И. Данилова-Данильяна. – М.: Изд-во МИЭПУ, 1997. – 744 с.

249. Электродуговая пароплазменная переработка медицинских отходов и углеродсодержащих материалов [Электронный ресурс] / А. В. Чернец, В. Н. Коржик, Г. С. Маринский и др. – Режим доступа: http://plazer.com.ua/docs/pdf/plazma_pererabotka.pdf.

250. Энерготехнологии и ресурсосбережение [Текст] / А. Н. Братцев, В. А. Кузнецов, А. С. Лернер и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 4. – С. 29–32.

251. Яцик, А. В. Екологічна безпека в Україні [Текст] / А. В. Яцик. – К., 2003. – 216 с.

252. Материалы и химические технологии для авиационной техники [Электронный ресурс] / Е. Н. Кабалов. – Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/2012/2012-205984.pdf>.

253. Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams / B. Lemmens, H. Elslander, I. Vanderreydt et al. // Waste Manage. – 2007. – Vol. 27(11). – PP. 1562 – 1569.

254. Biomass gasification – tar and particles in product gases – sampling and analysis. – URL: http://www.eeci.net/results/pdf/CEN-Tar-Standard-draft-version-2_1-new-template-version-05-11-04.pdf.

255. Building detection and Recognition from High Resolution Remotely Sensed Imagery [Text] / S. Y. Cui, Q. Yan, Z. J. Liu, M. Li // Proceedings of XXI ISPRS Congress. – Beijing, China, 2008. – Vol. XXXVII. – P. 411 – 416.

256. Choe G. I., Lee D. H., Kim N. J. J. Korea Society of Waste Management, 2014. – № 21. – P. 143.

257. Crowe, C. T. The particle-source-in-cell (PSICELL) model for gas-droplet flows / C. T. Crowe, M. P. Sharma, D. E. Stock // ASME Trans. J. Fluids Eng. – 1977. – 8 p.

258. Donaldson A. D. A review of Plasma Destruction of Hazardous Mixed Wastes [Text] / A. D. Donaldson and coworkers // HTD. – Vol. 161: Heat transfer in Thermal Plasma Processing, ASME, 1991. – P. 41.

259. Elling B. Strategic environmental assessment in Denmark [Text] / B. Elling. – D. : EIA Centre, Department of Technology and Social Studies, 1994. – 92 p.

260. Elling B. Strategic environmental assessment of national policies: the Danish experience of a full concept assessment [Text] / B. Elling // Journal of project appraisal. – 1997. – № 12 (3). – P. 161 – 172.

261. Falcucci, G. Integrated numerical and experimental study of a MCFC-plasma gasifier energy system [Text] / G. Falcucci, E. Jannelli, M. Minutillo et al. // Appl Energy. – 2012. – Vol. 97. – P. 734 – 742.

262. Formation of PCDDs and PCDFs by the chlorination of water / C. Rappe, S. E. Swanson, B. Glas et al. // Chemosphere. – 1989. – № 19. – P. 1875 – 1880.

263. Geoinformation Technologies in decision issues of municipal solid waste [Text] / O. Trofymchuk, V. Trysnyuk, N. Novokhatska, I. Radchuk // Journal of Environmental Science and Engineering. – 2014. – A 3. – P. 183 – 187.

264. H. I. Kim and D. W. Park, J. Ind. Eng Chem., 10, 234 (2004).

265. H. S. Park and B. J. Lee, J. Korea Society of Waste Management, 218, 722 (2001).

266. H. S. Park and J. D. Chung, J. Korea Society of Waste Management, 18, 302 (2001).

267. Ha, S. A. Waste incineration [Text] / S. A. Ha, H. J. Son, N. C. Sung // J. Korea Society of Waste Management. – Korea, 2000. – Vol. 17. – 665 p.

268. Hyun-Seo Park, Beom-Jae Lee, and Seong-Jung Kim. Medical Waste Treatment Using Plasma / Ind. Eng. Chem., Vol. 11, № 3, (2005). – P. 353 – 360.

269. Hyun-Seo Park. Medical Waste Treatment Using Plasma [Text] / Hyun-Seo Park, Beom-Jae Lee, Seong-Jung Kim // Industrial & Engineering Chemistry. – 2005. – Vol. 11, № 3. – P. 353–360.

270. Jensen, J. R. Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective [Text] / J. R. Jensen. – Prentice Hall, 2000. – 544 p.

271. Jones-Lee A. Groundwater Pollution by Municipal Landfills: Leachate Composition, Detection and Water Quality Significance [Text] / Jones-Lee A., Lee G. F. // IV International Landfill Symposium. – Sardinia, Italy, 2005. – p. 1093 – 1103.

272. Jordan A., Akay G. // Biomass and bioenergy. – 2012. – Vol. 42. – P. 51.

273. Jurgen, W. Frick. User benefits of modern air mist nozzle and secondary cooling system technology. Lechler GmbH & Co KG, Germany. – Режим доступа: [www/ URL: http:// www.lechler.de/pdf/user_benefits_of.pdf](http://www.lechler.de/pdf/user_benefits_of.pdf).

274. Kim Y. J., Ohsako M., You J. C., Lee D. H., J. Korea Society of Waste Management, 2001. – № 21. – P. 51.

275. Launder B. E., Spalding D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text]. Academic Press, London, England, 1972.

276. Launder B. E., Spalding D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flows [Text] // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – №. 3. – P. 269–289.

277. Leaching toxicity characteristics of municipal solid waste incineration bottom ash / Yi Xia, Hua Zhang, Liming Shao, Pinjing He // Frontiers of Environmental Science & Engineering, 09/2015.

278. Marine pollution monitoring of the black sea ports and waterways by GIS and remote sensing [Text] / V. Radchuk, A. Palazov, G. Krasovskiy, V. Slabakova, O. Hristova, N. Novokhatska // Book of abstracts international conference «Marine research horizon 2020». – Varna, Bulgaria, 2013. – P. 196.

279. Mayerhofer M., Mitsakis P., Meng X., et al. // Fuel. – 2012. – Vol. 99. – P. 204.

280. Milne T. A., Evans R. J. Biomass Gasifier «Tars»: Their Nature, Formation, and Conversion. – Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1998.

281. Municipal solid waste composition study [Text] / Țugui T., Duca Gh., Țăranu M., Mîrza V., Drăguțan, I. // The Bulletin of the Academy of Sciences of Moldova, Series «Biological, Chemical and Agricultural Sciences». – 2004. – № 4. – P. 114 – 119.

282. Nickolas J. Themelis., Marco J. Castaldi Technical and economic analysis of thermal plasma–assisted Waste-to-Energy. – Columbia, Columbia University, 2010. – 80 p.

283. Novokhatska N. A. Use of modern information technologies for management of place the accumulation of waste [Text] / N. A. Novokhatska // Materials I International scientific conference of young scientists and specialists on theme «Role of multidisciplinary approach in solving actual problems of fundamental and applied sciences». – Baku, 2014. – P. 272 – 274.

284. Park, H. S. Secondary environmental problem during incineration [Text] / H. S. Park, B. J. Lee // J. Korea Society of Waste Management. – Korea, 2001. – Vol. 218. – 722 p.

285. Park, H. S. The formation of dioxins from waste incineration [Text] / H. S. Park, J. D. Chung // J. Korea Society of Waste Management. – Korea, 2001. – Vol. 18. – 302 p.

286. Pragnesh N. Dave, Asim Joshi Plasma pyrolysis and gasification of plastics waste // A review Review Journal of Scientific & Industrial Research, 04/2010.

287. Peter Montague, RACHEL'S ENVIRONMENT & HEALTH WEEKLY #226, March 27, 1991.

288. Properties and optimizing of a plasma gasification & melting process of municipal solid waste / Q. Zhang, L. Dor, W. Yang, W. Blasiak // Proceedings of international conference of thermal treatment technology & hazardous waste combustors (IT3/HWC). – San Francisco, California, USA. – 2010. – PP. 296 – 316.

289. Relap5/MOD3 Cod Manual Nureg/CR - 5535 (INEL - 95/0174), Volumes I-V, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, Idaho, June 1995.

290. Rutberg Ph. G., Bratsev A. N., Kuznetsov V. A., etal. // Biomass and Bioenergy. – 2011. – Vol. 35. –P. 495.

291. S. A. Ha, H. J. Son, and N. C. Sung, J. Korea Society of Waste Management, 17, 665 (2000).

292. Safaa M. Raghav Treatment of leachate from municipal solid waste landfill [Text] / Safaa M. Raghav, Ahmed M. Abd El Meguid, Hala A. Hegazi // HBRC Journal. – 2013. – Volume 9, Issue 2. – P. 187–192.

293. Schmidt D. P. A Two-Dimensional, Non-Equilibrium Model of Flashing Nozzle Flow / D. P. Schmidt, M. L. Corradini, C. J. Rutland // 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 1999.

294. Secured landfills for disposal of municipal solid waste [Text] / M. Alekhya, N. Divya, G. Jyothirmai, Dr. K. Rajashekhar Reddy // International Journal of Engineering Research and General Science. – 2013. – Vol. 1, Issue 1. – p. 368–373.

295. Shmandij, V. M. Conceptual basis of creation of ecological safety management model, which uses multiphase dispersed structures [Текст] / V. M. Shmandij, V. V. Vambol', O. M. Kondratenko // Вестник Кокшетауского технического института Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2016. – № 4 (20). – С. 115–121.

296. Reed, Sherwood C/ Natural systems for waste management and treatment / S.C. Reed, R.W. Crites, E.J. Middlebrooks – 2nd – New York: McGraw – Hill, 1995. – 433 p.

297. Šulc J., Štojdl J., Richter M., et al. // Waste Management. – Vol. 32. – Issue 4. – P. 692.

298. The systematic approach to solving the problem of management of ecological safety during process of biowaste products utilization [Text] / V. Vambol', V. Shmandij, S. Vambol', O. Kondratenko // Екологічна безпека. – Кременчук: КрНУ, 2015. – 1/2015 (19). – С. 7 – 11.

299. Themelis, N. J. Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes [Text] / Nickolas J. Themelis, Marco J. Castaldi. – Columbia: Columbia University, 2010. – 79 p.

300. Vambol, S. A. Economic and energetical analysis of improved waste utilization plasma technology [Text] / S. A. Vambol, V. V. Vambol // Economy and Sociology. – Chisinau Republic of Moldova: National Institute For Economic Research, 2015. – № 3. – P. 31–38.

301. Vandoormaal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows // Numer. Heat Transfer. – 1984. – №. 7. – P. 147 – 163.

302. Vehlow J. Thermische Behandlungsverfahren fuer Hausmuellim Vergleich. – Graz.: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut fuer Technische Chemie, Bereich Thermische Abfallbehandlung, 1998. – 37 p.

303. Wood C. Strategic Environmental Assessment [Text] / C. Wood, N. Lee. – Manchester : Manchester EIA Centre, 1995. – 298 p.

304. Zhang, Q. Properties and optimizing of a plasma gasification & melting process of municipal solid waste [Text] / Q. Zhang, L. Dor, W. Yang, W. Blasiak // Proceedings of international conference of thermal treatment technology & hazardous waste combustors (IT3/HWC). – San Francisco, California, USA. – 2010. – P. 296–316.

305. Ларионов, А. И. Анализ и оценка конкурирующих технологий для термической обработки, обезвреживания и утилизации отходов производства и потребления [Электронный ресурс] / А. И. Ларионов. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-otsenka-konkuriruyuschih-tehnologiy-dlya-termicheskoy-obrabotki-obezvrezhivaniya-i-utilizatsii-othodov-proizvodstva-i>.

306. Livits J., McKenna A., Seif F. Предложение по оборудованию для обработки отходов посредством плазменного реактора и импульсной системы питания для Калининградской области, Россия [Текст] / J. Livits, A. McKenna, F. Seif // Проект компаний «Американское торговое партнерство в России», S.A.A. International holdings corp. (CANADA) ltd. и Dutemp corp, 2007. – 51 с.

307. Lemmens, B. Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams [Text] / B. Lemmens, H. Elslander, I. Vanderreydt, K. Peys, L. Diels, M. Oosterlinck, M. Joos // Waste Manage. – 2007. – Vol. 27, Issue 11. – P. 1562–1569. doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.027.

308. Данілішин, Б.М. Природно-техногенні катастрофи: проблема економічного аналізу та управління [Текст] / Б.М. Данілішин. – К. : УІНСіР, 2002. – 153 с.

309. Основные направления исследований, основанные на семантическом анализе текстов [Электронный ресурс] / С.-Пб. гос. ун-т, фак. прикладной математики и процессов управления. – Режим доступа: [www/URL: http://arcp.apmath.spbu.ru/ru/staff/tuzov/onapr.html/](http://arcp.apmath.spbu.ru/ru/staff/tuzov/onapr.html/). – Загл. с экрана.

310. Гречко, А. В. Региональный характер проблемы твердых бытовых и промышленных отходов и ее решение пирометаллургическим методом [Текст] / А. В. Гречко, В. Ф. Деннисов, Л. А. Федоров // Экология и промышленность России. – 1997. – № 10. – С. 13–16.

311. Parafeinik, V. P. Thermodynamic analysis of the efficiency of air coolers in a petroleum gas compressor installation [Text] / V. P. Parafeinik, I. I. Petukhov, V. N. Syryi, Yu. V. Shakhov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2004. – Vol. 40, Issue 7-8. – P. 467–474.

312. Parafeinik, V. P. Thermodynamic analysis of efficiency of air cooling unit in compressor plant of oil gas [Text] / V. P. Parafeinik, I. I. Petukhov, V. N. Syryi, Yu. V. Shakhov // Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie. – 2004. – Vol. 8. – P. 23–27.

313. Матмодель расчета сепаратора и компрессора блока разделения газовых смесей при утилизации отходов [Текст] / С. А. Вамболь, Ю. В. Шахов, И. И. Петухов, В. В. Вамболь // Технологический аудит и резервы производства. – Х., 2016. – № 1 (27). – С. 17–26.

314. Математическое описание процессов разделения газовых смесей образующихся при термической утилизации отходов [Текст] / С. А. Вамболь, Ю. В. Шахов, И. И. Петухов, В. В. Вамболь // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Х., 2016. – № 1/2(79). – С. 32–42.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

На рисунках А.1 – А.3 представлены дисперсия, эксцесс и асимметрия полигона для февраля 2014 года.

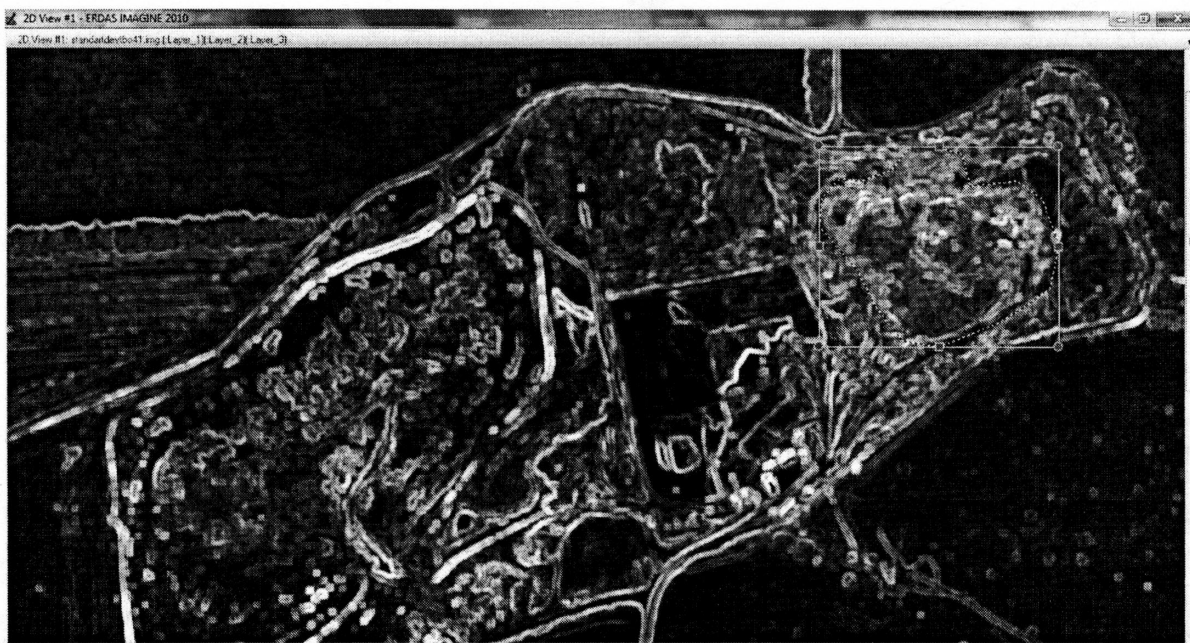


Рис. А.1. Дисперсия Дергачевского полигона ТБО (февраль 2014 г.)

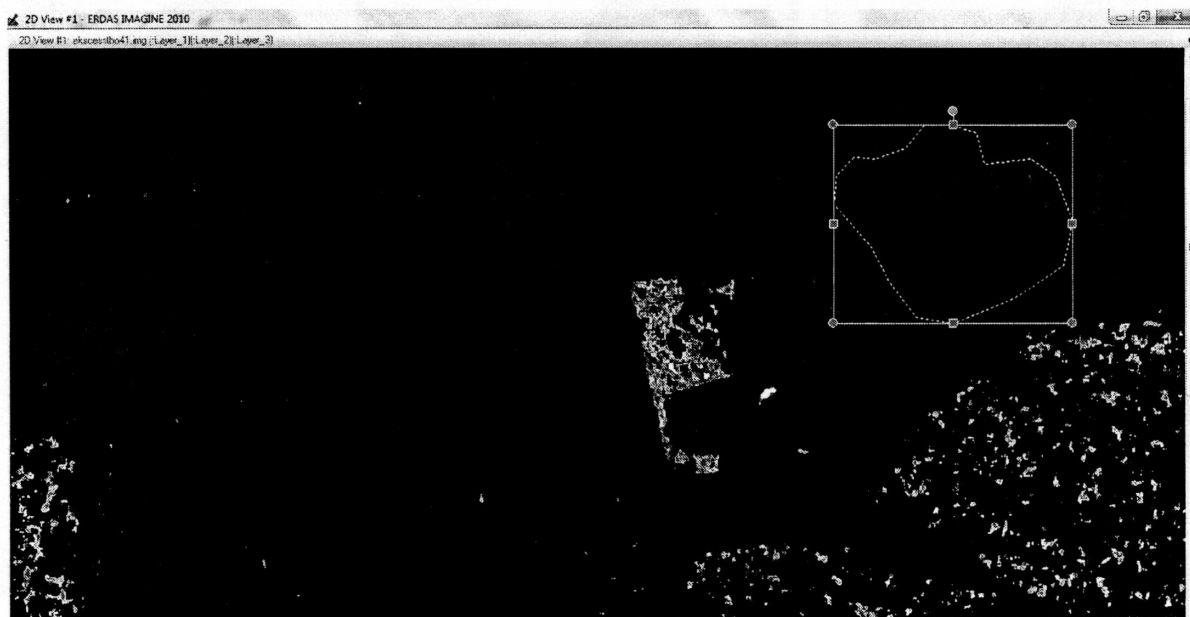


Рис. А.2. Эксцесс Дергачевского полигона ТБО (февраль 2014 г.)

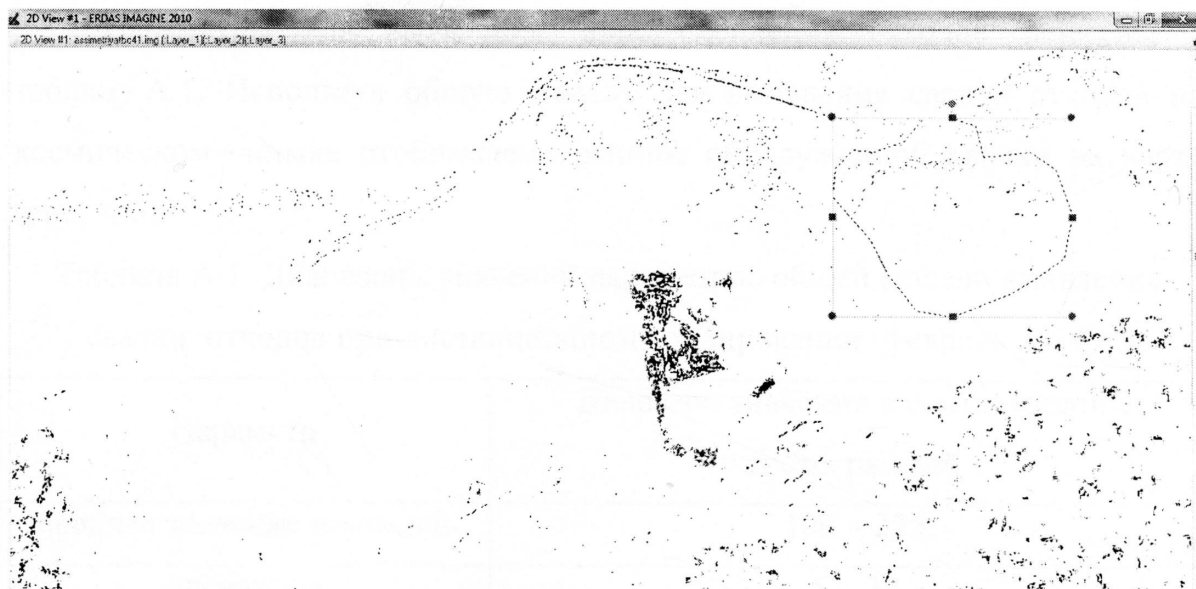


Рис. А.3. Асимметрия Дергачевского полигона ТБО (февраль 2014 г.)

Результаты расчета представлены в виде гистограмм среднего значения пикселя, дисперсии, эксцесса и асимметрии на рисунках А.4, А.5 для февраля 2014 года.

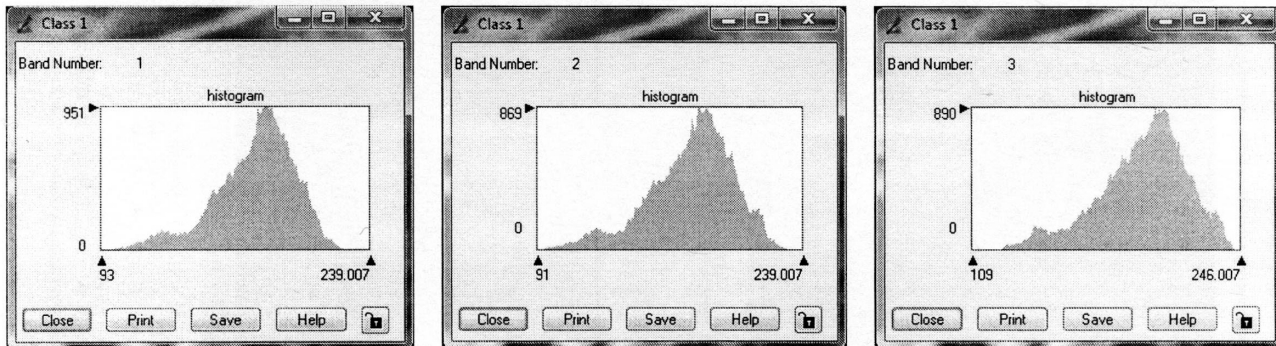


Рис. А.4. Гистограммы среднего значения пикселей (февраль 2014 г.)

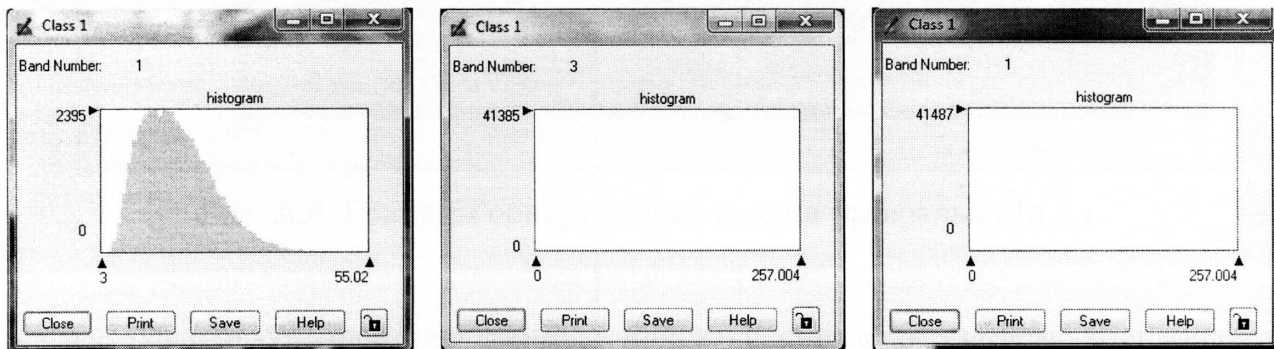


Рис. А.5. Гистограммы дисперсии, эксцесса и асимметрии (февраль 2014 г.)

Параметры для выявления зоны скопления отходов занесены в таблицу А.1. Используя общую модель для выявления свалки отходов на космическом снимке отображаем границы обнаруженной свалки на карте (рис. А.6).

Таблица А.1. Диапазоны значений параметров общей модели выявления свалки отходов при дистанционном зондировании (февраль 2014 г.)

Параметр	Диапазон значений в соответствии с гистограммой
среднее значение пикселей	100 – 225
дисперсия	5 – 38
эксцесс	0 – 1
асимметрия	0 – 1

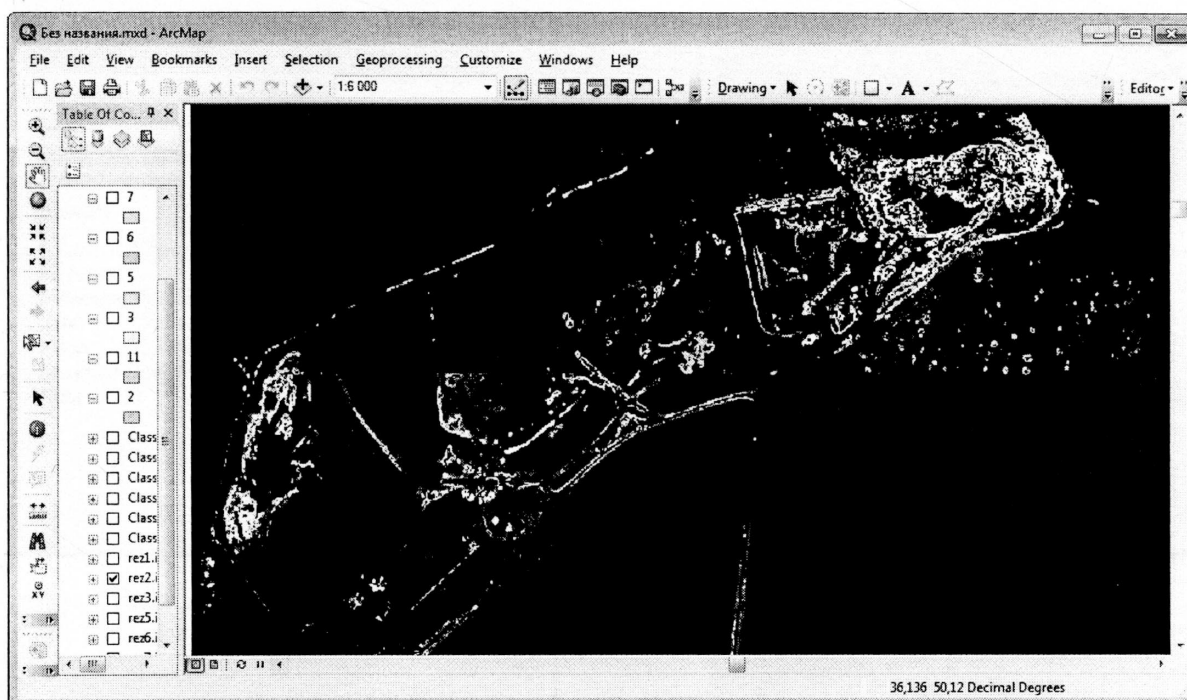


Рис. А.6. Границы обнаруженной свалки (февраль 2014 г.)

Используя пространственную привязку снимка к системе координат проводим векторизацию (рис. А.7) и расчет площади свалки ТБО (рис. А.8). Для расчетного месяца площадь свалки составила 29,6 тыс. м².

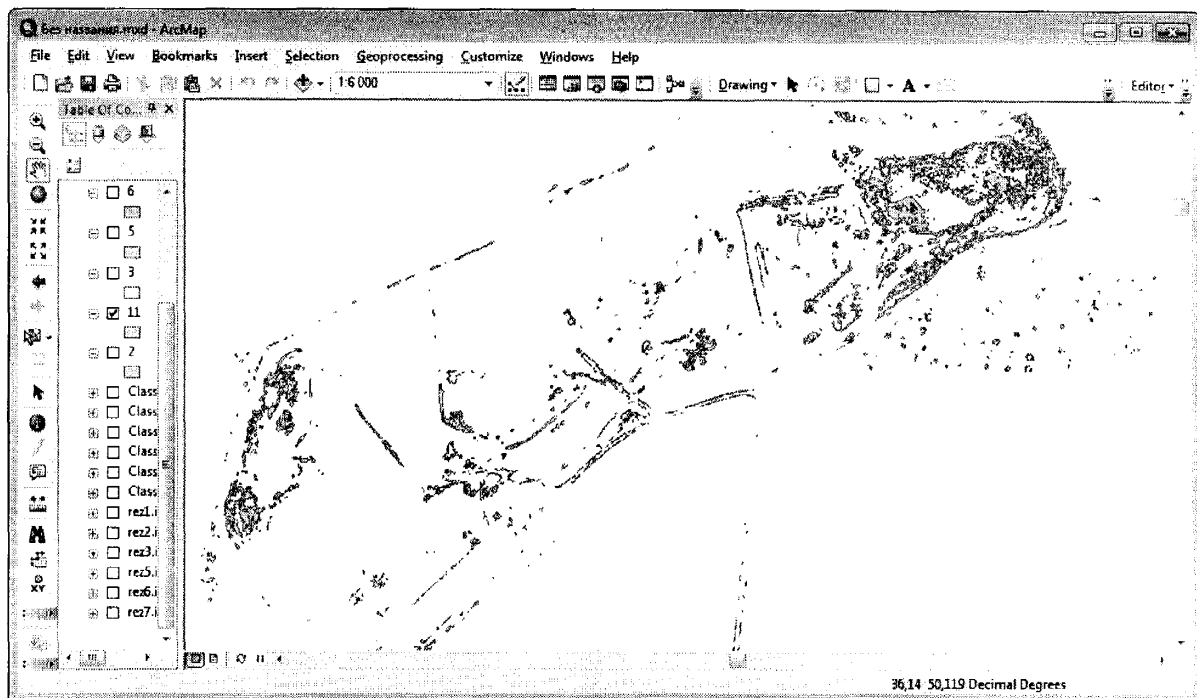


Рис. А.7. Векторизация обнаруженной свалки (февраль 2014 г.)

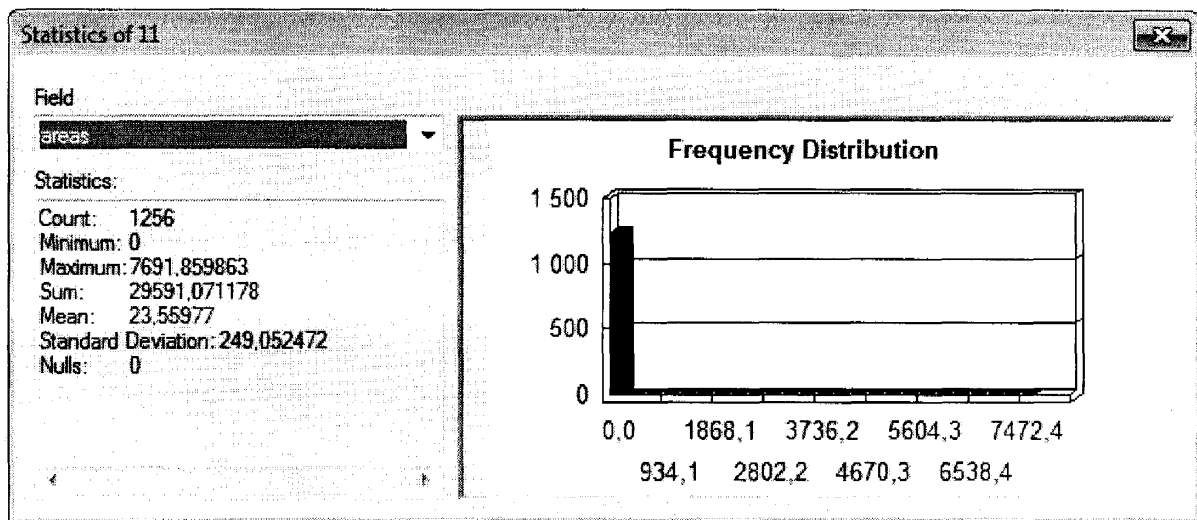


Рис. А.8. Площадь выявленной свалки отходов (февраль 2014 г.)

Аналогичным образом проводим расчеты для мая 2014 года. На рисунках А.9 – А.11 представлены дисперсия, эксцесс и асимметрия полигона.

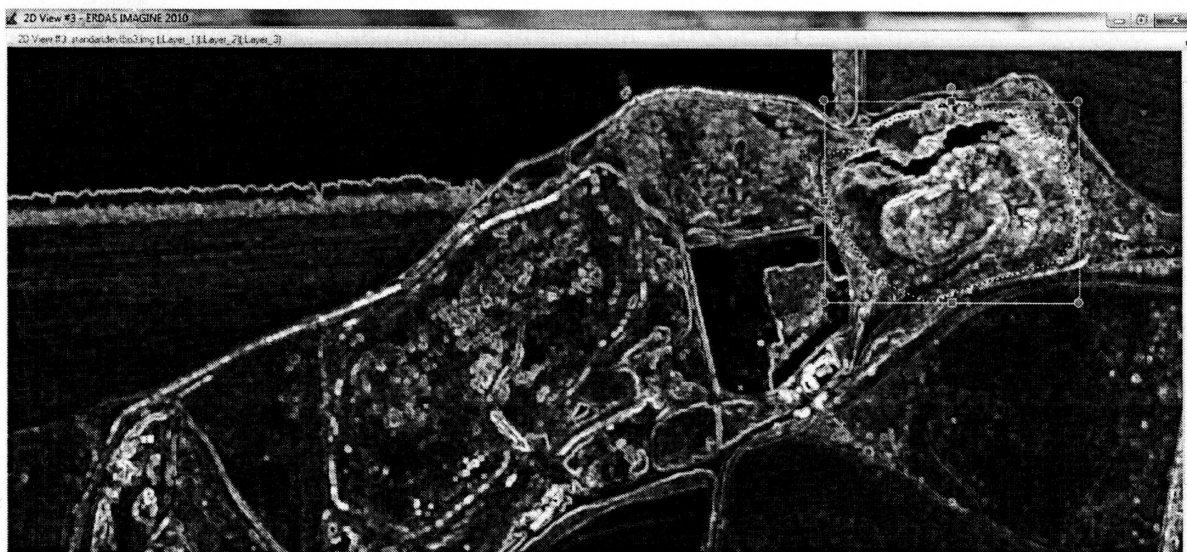


Рис. А.9. Дисперсия Дергачевского полигона ТБО (май 2014 г.)

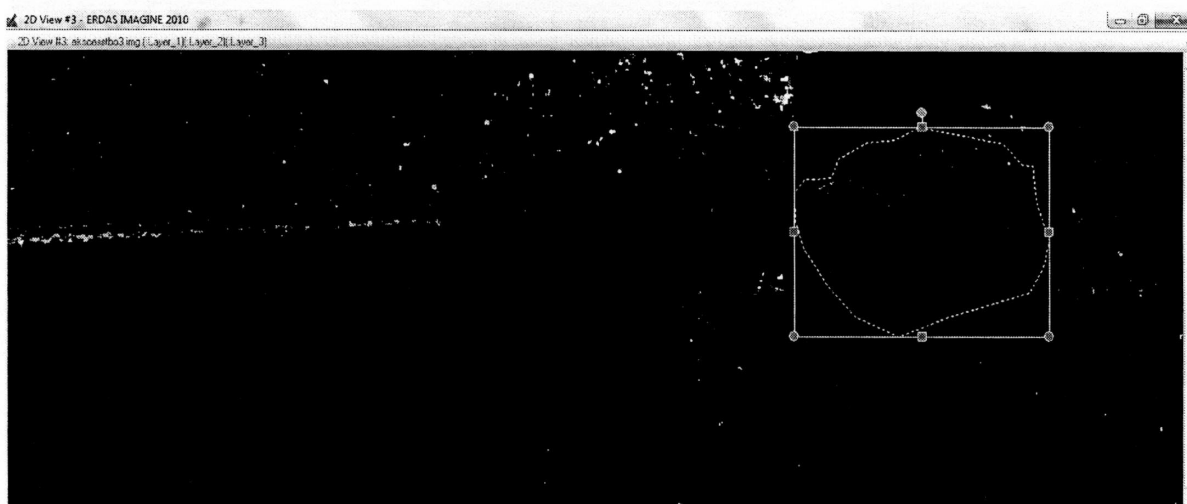


Рис. А.10. Эксцесс Дергачевского полигона ТБО (май 2014 г.)

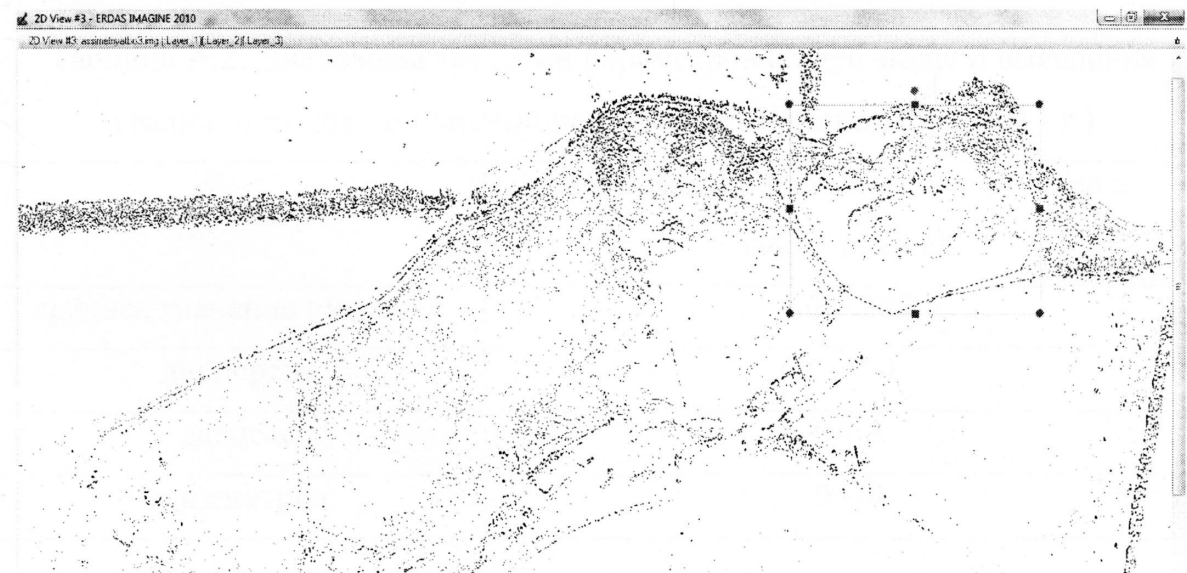


Рис. А.11. Асимметрия Дергачевского полигона ТБО (май 2014 г.)

Гистограммы среднего значения пикселя, дисперсия, эксцесс и асимметрия показаны на рисунках А.12, А.13 для мая 2014 года. Параметры для выявления зоны скопления отходов занесены в таблицу А.2. Границы обнаруженной свалки отображены карте (рис. А.14).

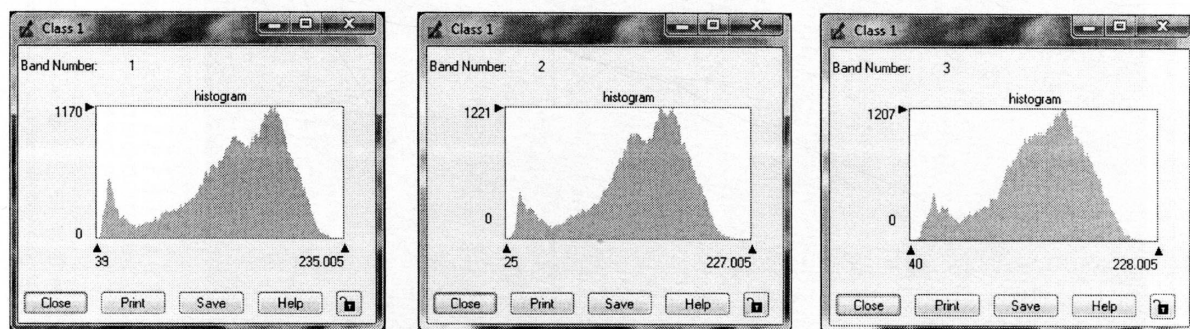


Рис. А.12. Гистограммы среднего значения пикселей (май 2014 г.)

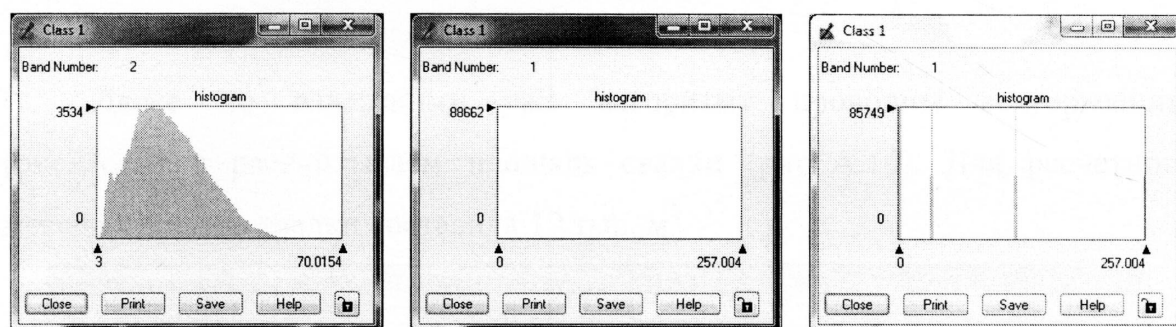


Рис. А.13. Гистограммы дисперсии, эксцесса и асимметрии (май 2014 г.)

Таблица А.2. Диапазоны значений параметров общей модели выявления свалки отходов при дистанционном зондировании (май 2014 г.)

Параметр	Диапазон значений в соответствии с гистограммой
среднее значение пикселей	40 – 200
дисперсия	5 – 50
эксцесс	0 – 1
асимметрия	0 – 4

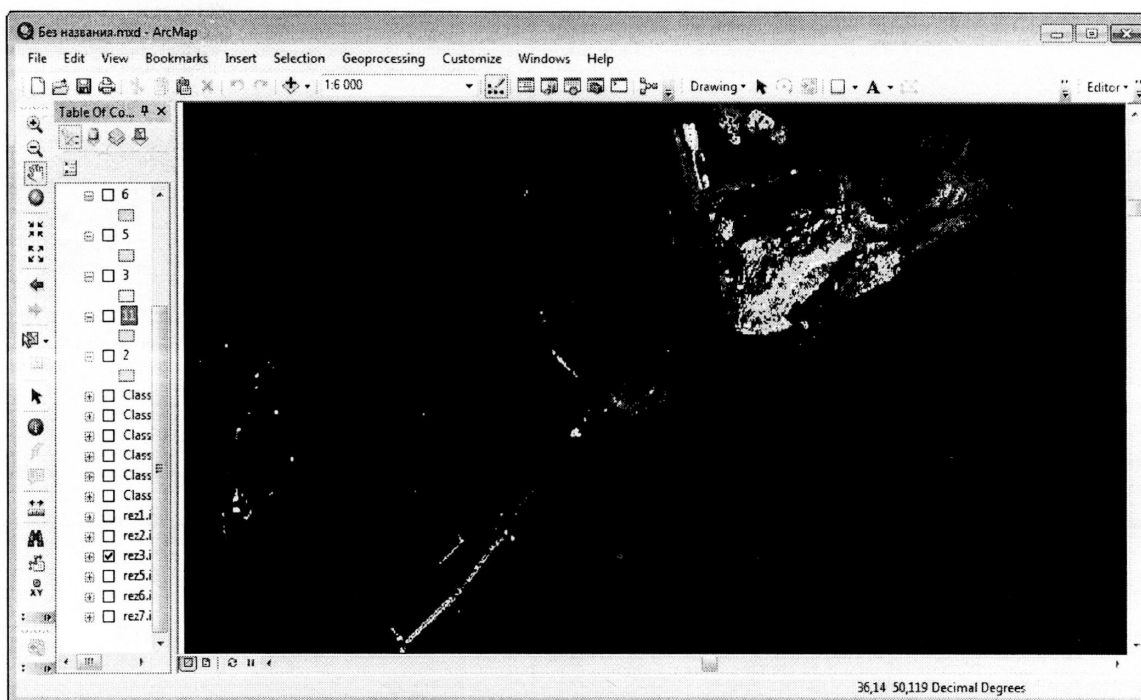


Рис. А.14. Границы обнаруженной свалки ТБО (май 2014 г.)

Далее по известному уже алгоритму проводим векторизацию (рис. А.15) и рассчитываем площадь свалки (рис. А.16). Для расчетного месяца площадь свалки составила 19 тыс. м².

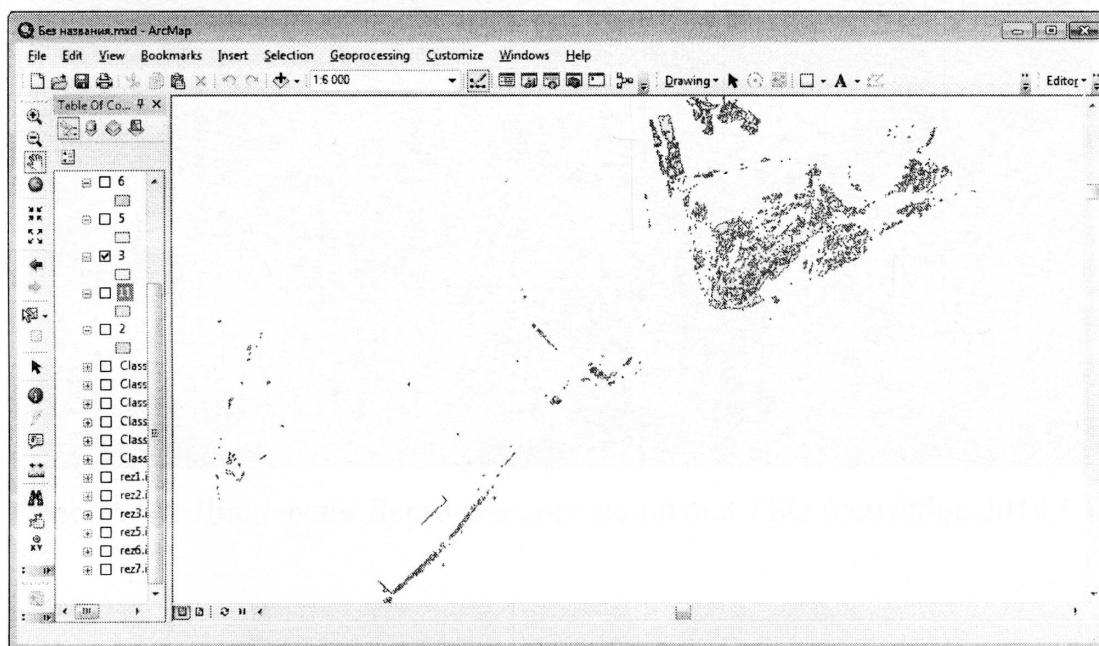


Рис. А.15. Векторизация обнаруженной свалки ТБО (май 2014 г.)

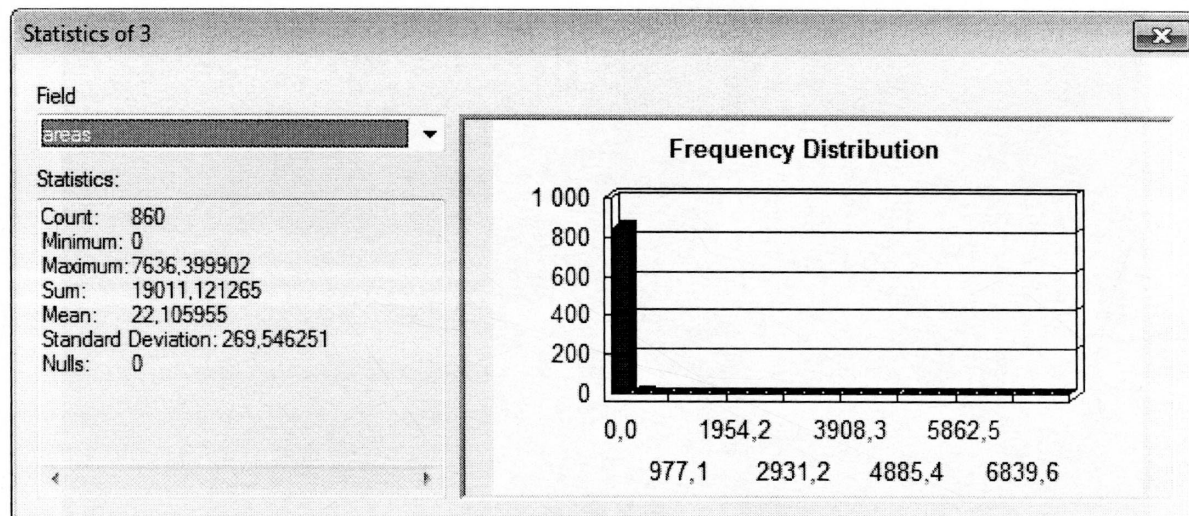


Рис. А.16. Площадь выявленной свалки отходов (май 2014 г.)

Результаты обработки данных, расчетные области, соответствующие гистограммы для сентября 2014 года представлены на рисунках А.17 – А.21.



Рис. А.17. Дисперсия Дергачевского полигона ТБО (сентябрь 2014 г.)

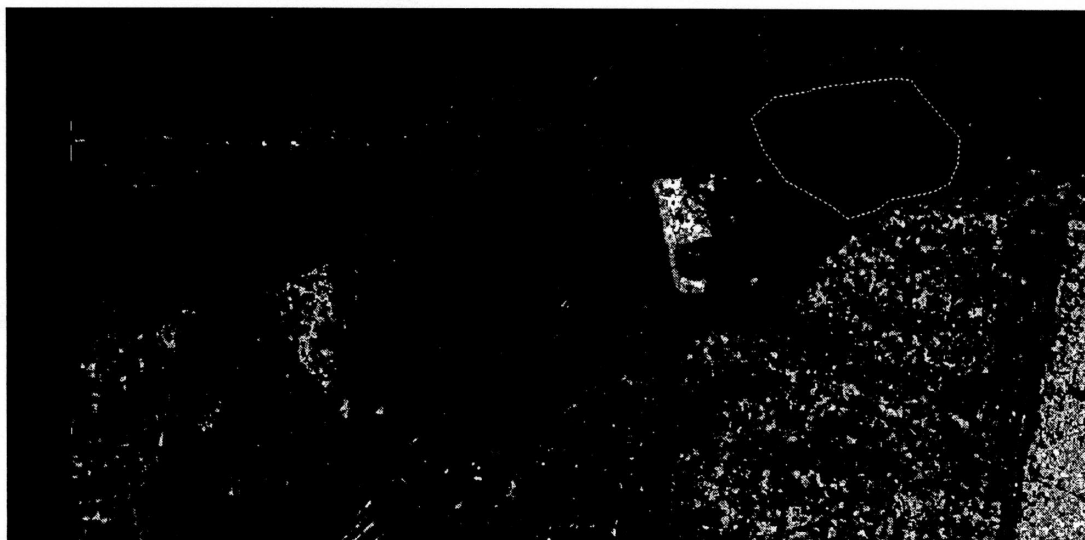


Рис. А.18. Эссес Дергачевского полигона ТБО (сентябрь 2014 г.)



Рис. А.19. Асимметрия Дергачевского полигона ТБО (сентябрь 2014 г.)

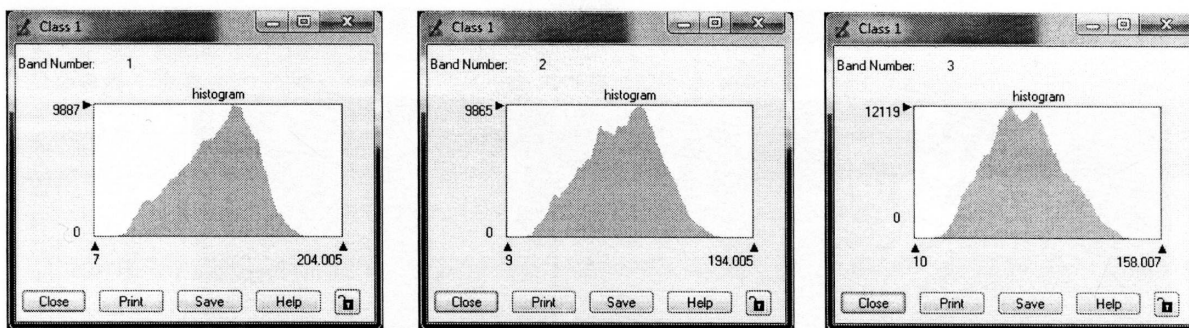


Рис. А.20. Гистограммы среднего значения пикселей (сентябрь 2014 г.)

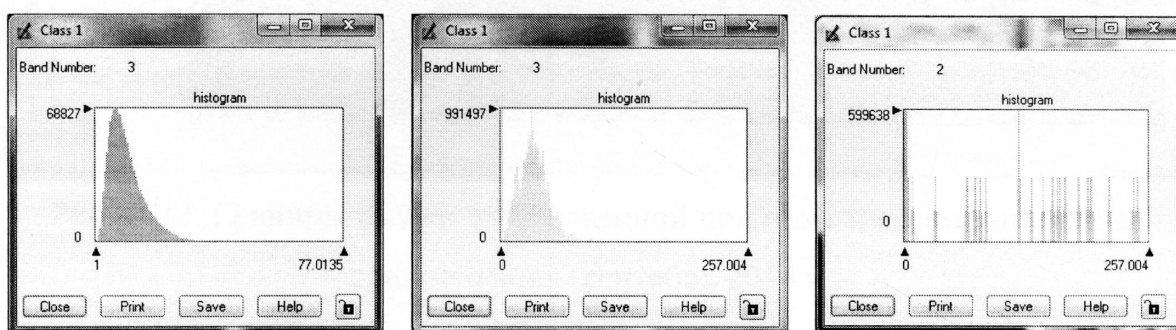


Рис. А.21. Гистограммы дисперсии, эксцесса, асимметрии (сентябрь 2014 г.)

Параметры для выявления зоны скопления отходов занесены в таблицу А.23. Границы обнаруженной свалки отображены карте (рис. А.22.).

Таблица А.3. Диапазоны значений параметров общей модели выявления свалки отходов при дистанционном зондировании (сентябрь 2014 г.)

Параметр	Диапазон значений в соответствии с гистограммой
среднее значение пикселей	70 – 175
дисперсия	3 – 37
эксцесс	0 – 4
асимметрия	0 – 2

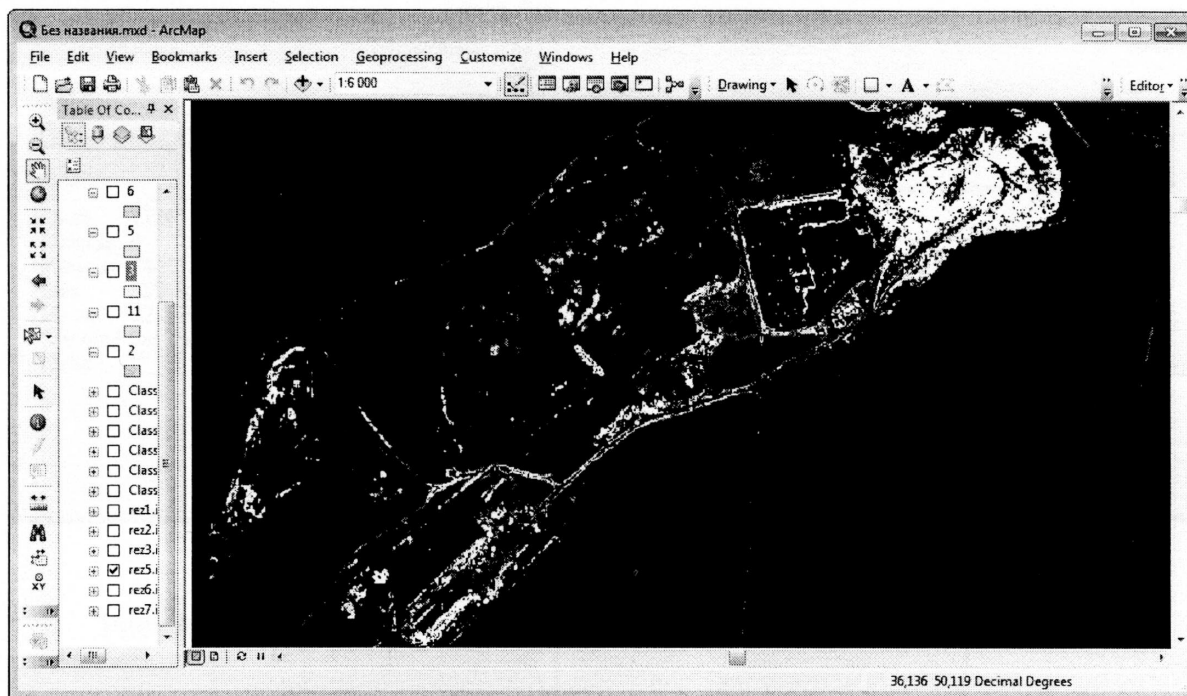


Рис. А.22. Границы свалки обнаруженной при помощи дистанционного зондирования (сентябрь 2014 г.)

Векторизация и расчет площади свалки ТБО представлены на рисунках А.23 и А.24 соответственно. Для сентября площадь свалки составила 55,5 тыс. м².



Рис. А.23. Векторизация обнаруженной свалки (сентябрь 2014 г.)

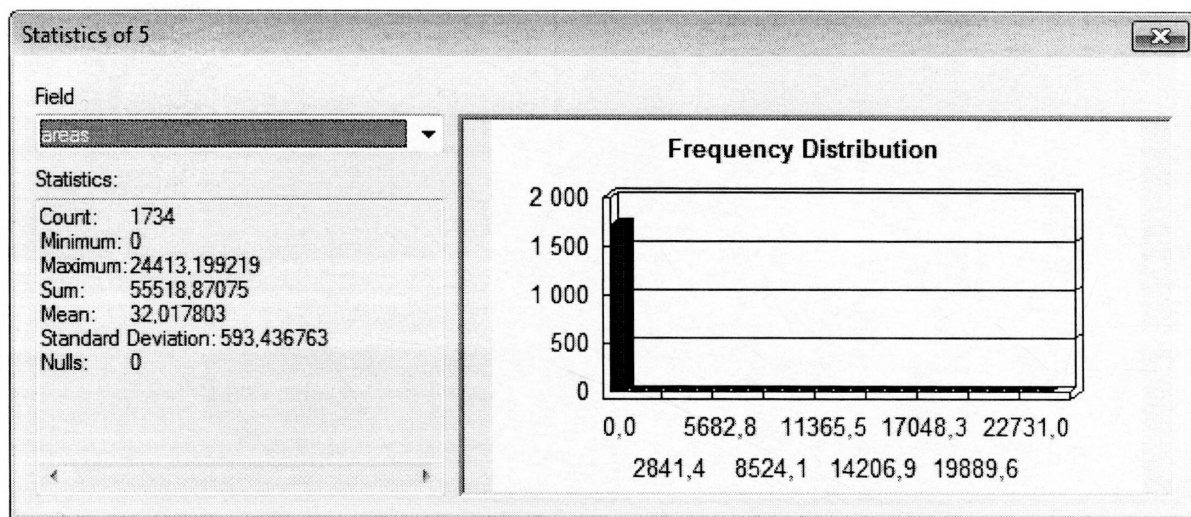


Рис. А.24. Площадь выявленной свалки отходов (сентябрь 2014 г.)

Таким же образом выполнялись расчеты полигона для октября 2014 г. Расчетные области, соответствующие гистограммы представлены на рисунках А.25 – А.29.

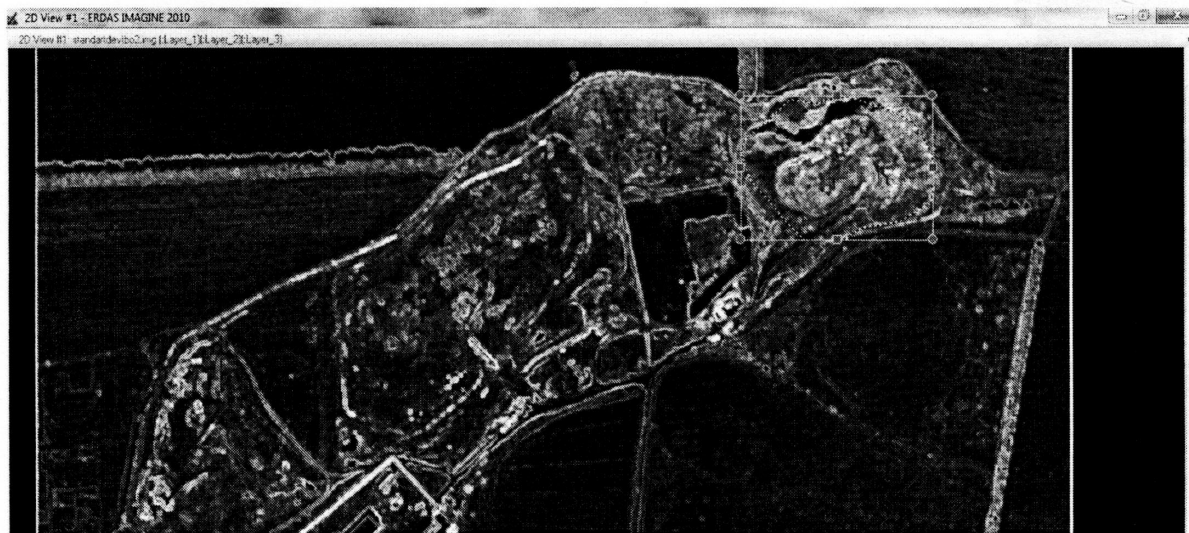


Рис. А.25. Дисперсия Дергачевского полигона ТБО (октябрь 2014 г.)



Рис. А.26. Эксцесс Дергачевского полигона ТБО (октябрь 2014 г.)



Рис. А.27. Асимметрия Дергачевского полигона ТБО (октябрь 2014 г.)

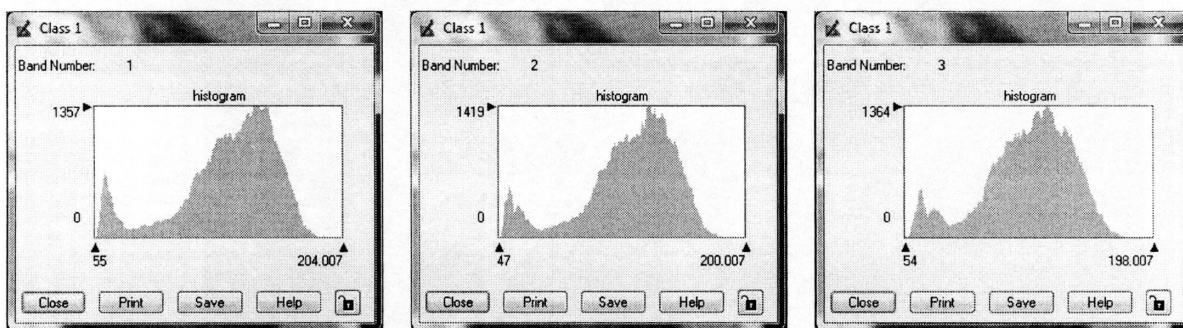


Рис. А.28. Гистограммы среднего значения пикселей (октябрь 2014 г.)

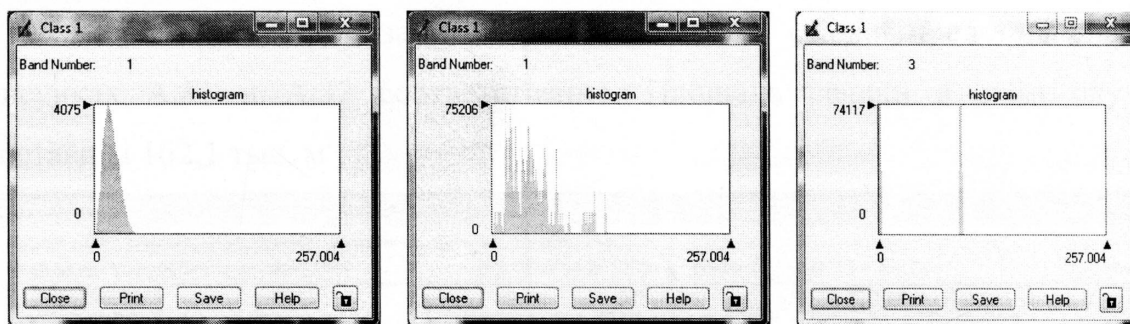


Рис. А.29. Гистограммы дисперсии, эксцесса, асимметрии (октябрь 2014 г.)

В таблицу А.4 внесены параметры для выявления зоны скопления. Границы обнаруженной свалки представлены карте (рис. А.30).

Таблица А.4. Диапазоны значений параметров общей модели выявления свалки отходов при дистанционном зондировании (октябрь 2014 г.)

Параметр	Диапазон значений в соответствии с гистограммой
среднее значение пикселей	50 – 180
дисперсия	2 – 40
эксцесс	0 – 12
асимметрия	0 – 5

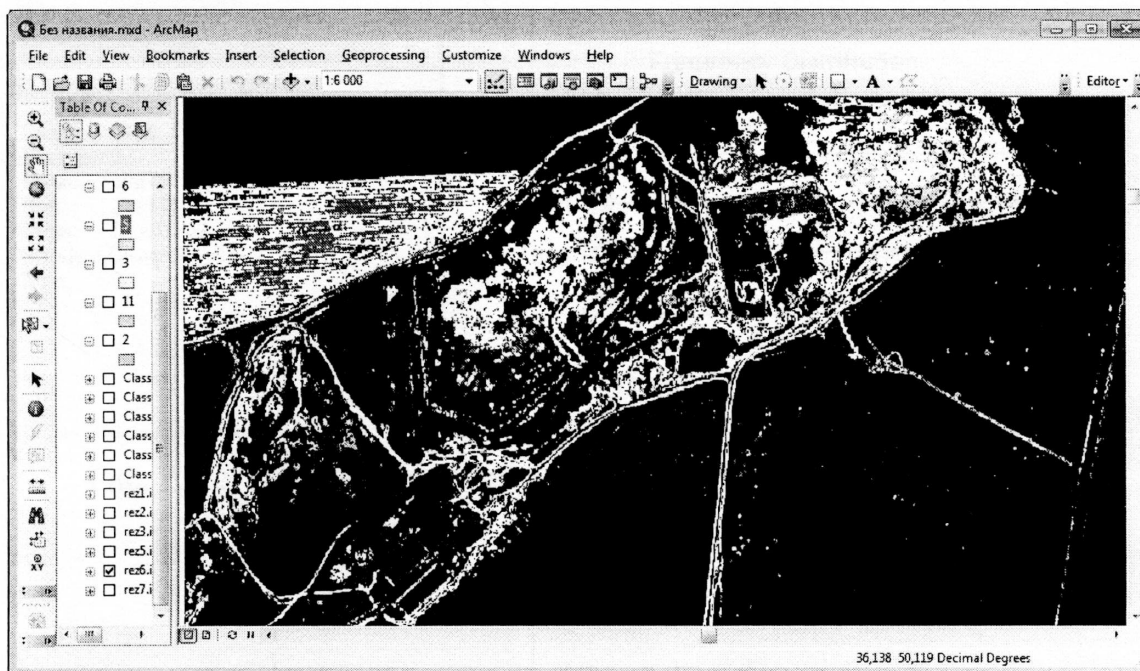


Рис. А.30. Границы свалки обнаруженной при помощи дистанционного зондирования (октябрь 2014 г.)

Результаты векторизации и расчет площади свалки представлены на рисунках А.31 и А.32 соответственно. Площадь свалки в этом случае составила 162,1 тыс. м².

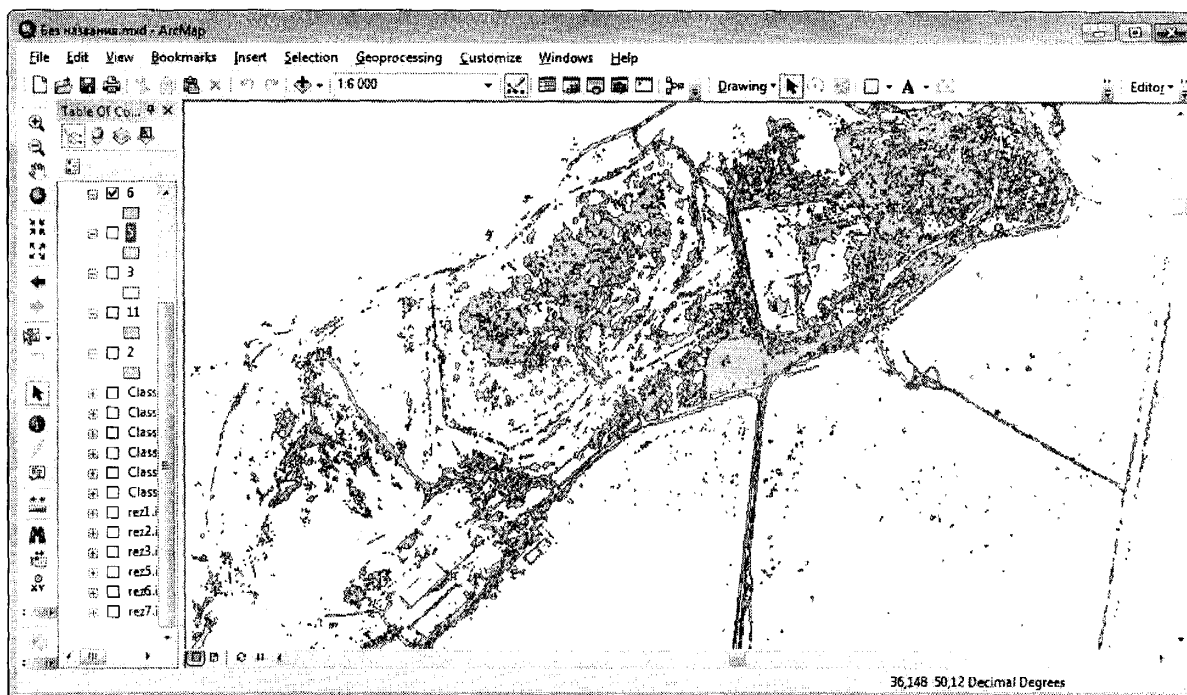


Рис. А.31. Векторизация обнаруженной свалки (октябрь 2014 г.)

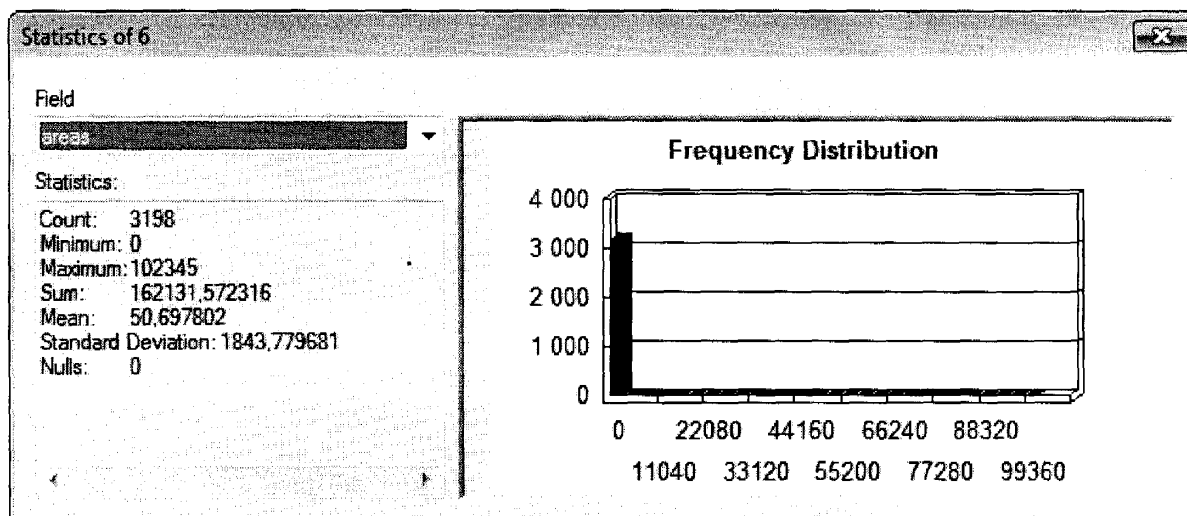


Рис. А.32. Площадь выявленной свалки отходов (октябрь 2014 г.)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ
ОБНАРУЖЕНИЯ СВАЛОК



Рис. Б.1. Дергачевский полигон ТБО (август 2013 г.)

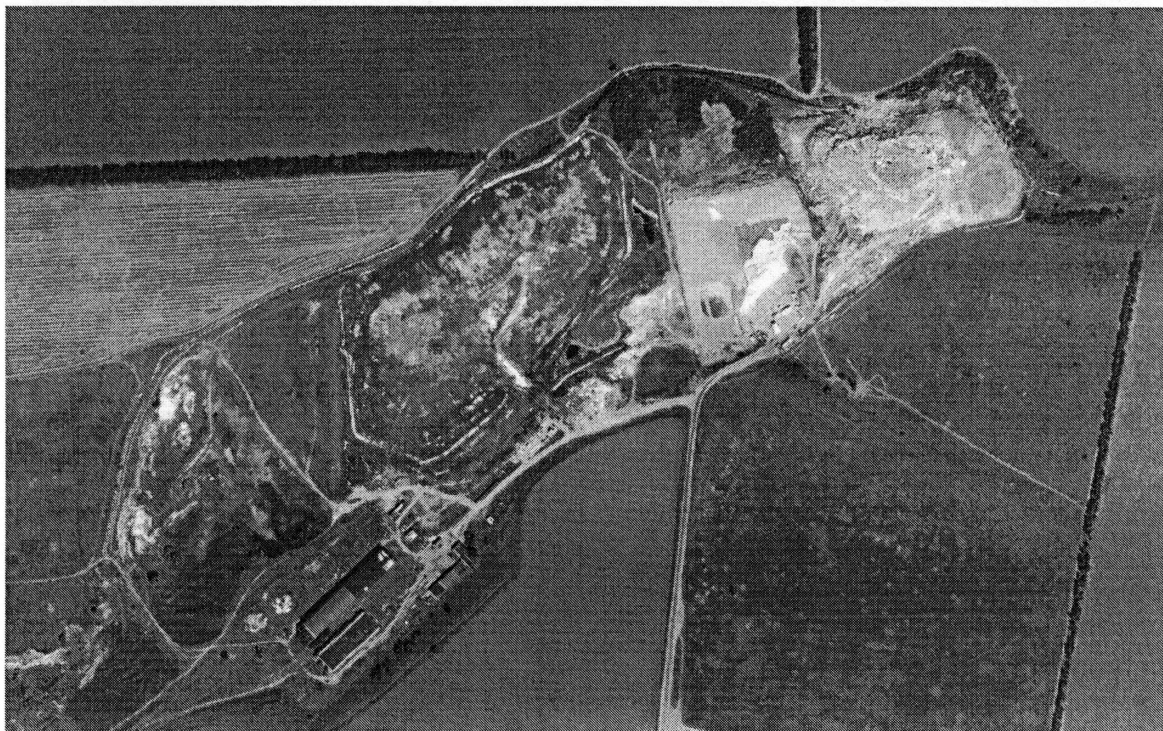


Рис. Б.2. Дергачевский полигон ТБО (февраль 2014 г.)



Рис. Б.3. Дергачевский полигон ТБО (май 2014 г.)



Рис. Б.4. Дергачевский полигон ТБО (июнь 2014 г.)



Рис. Б.5. Дергачевский полигон ТБО (сентябрь 2014 г.)

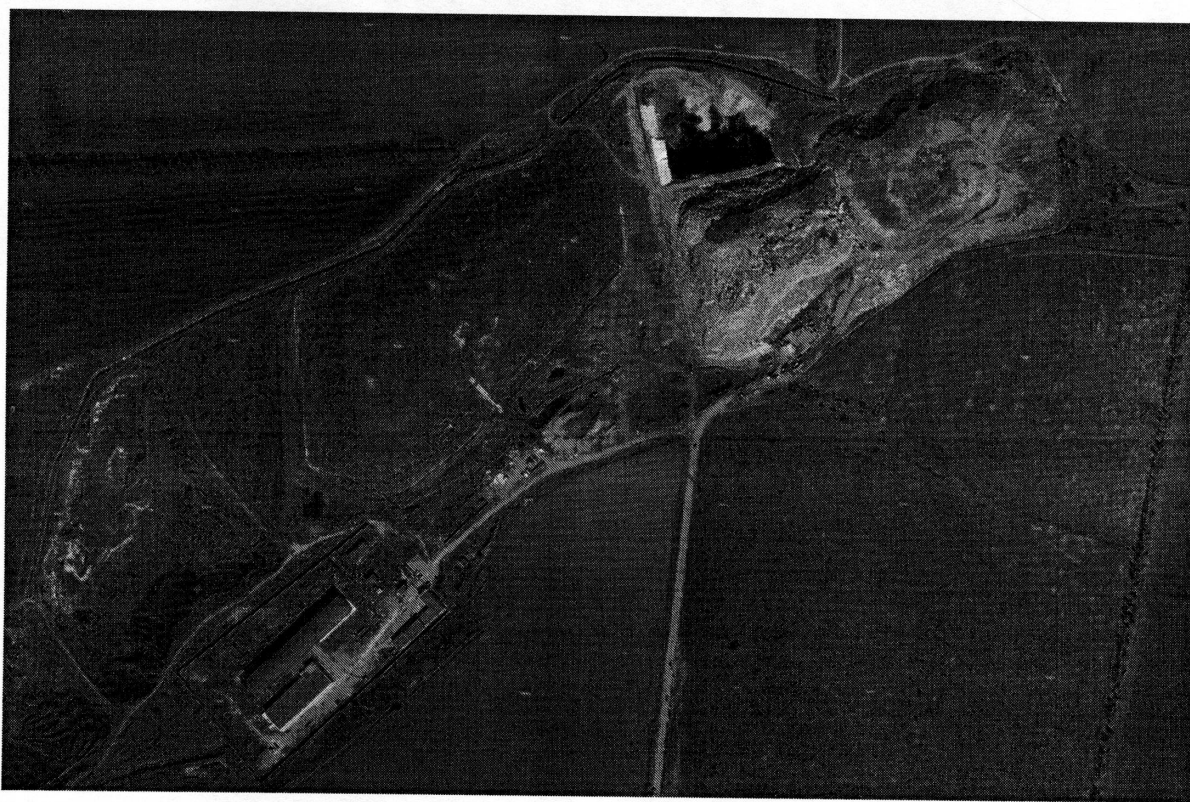


Рис. Б.6. Дергачевский полигон ТБО (октябрь 2014 г.)

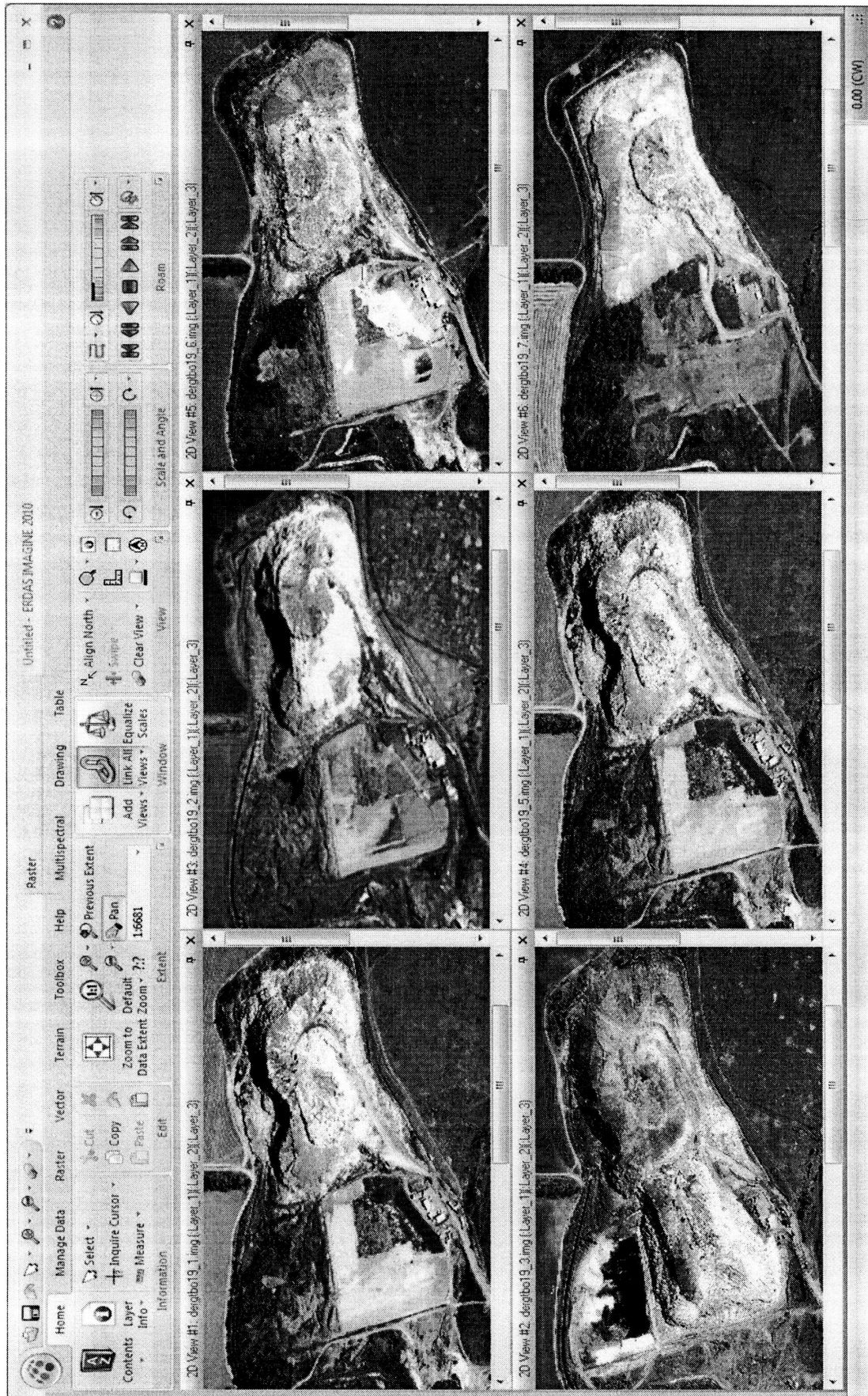


Рис. Б.7. Космические снимки Дергачевского полигона ТБО

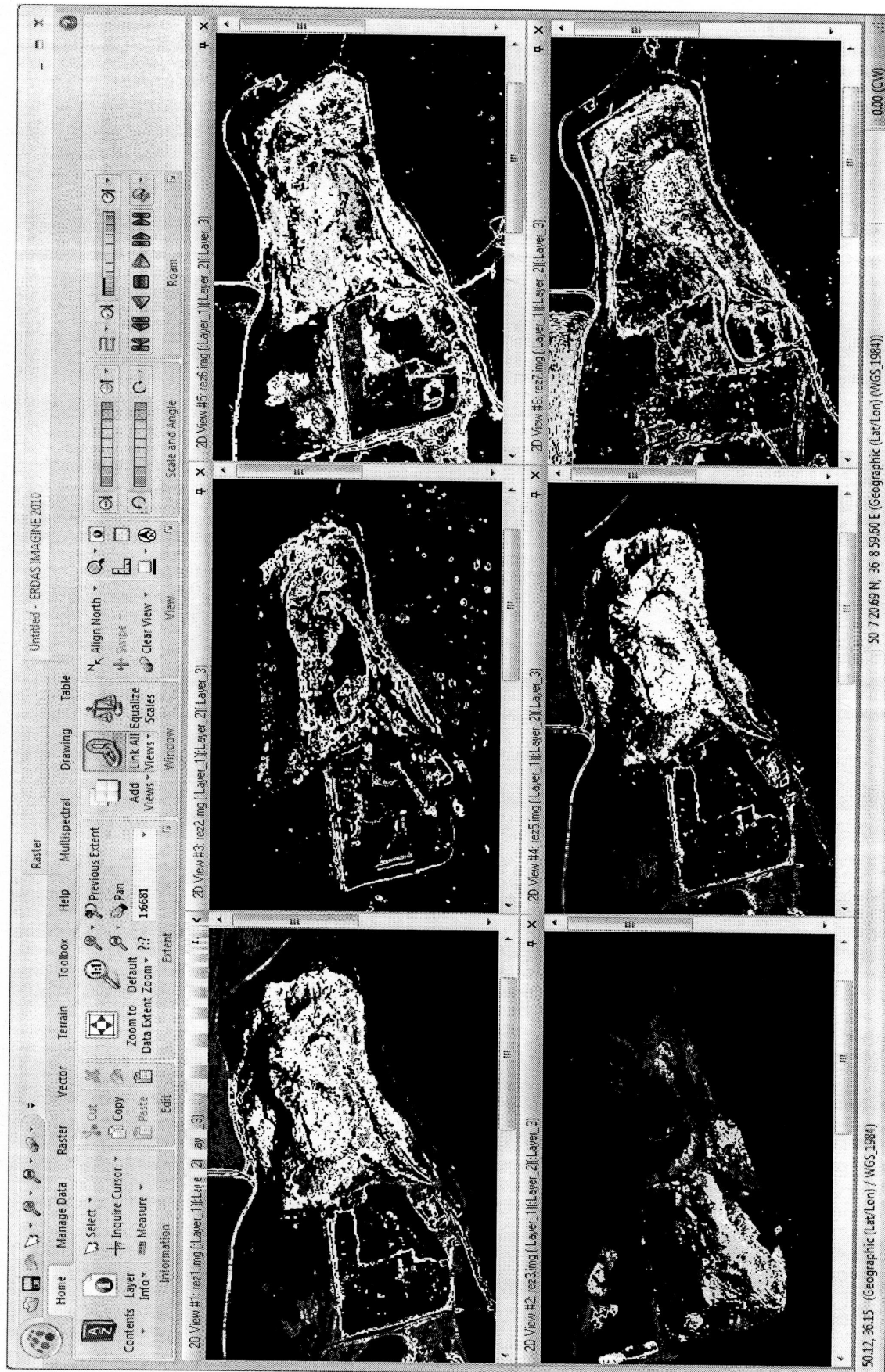


Рис. Б.8. Результаты выделения Дергачевского полигона ТБО

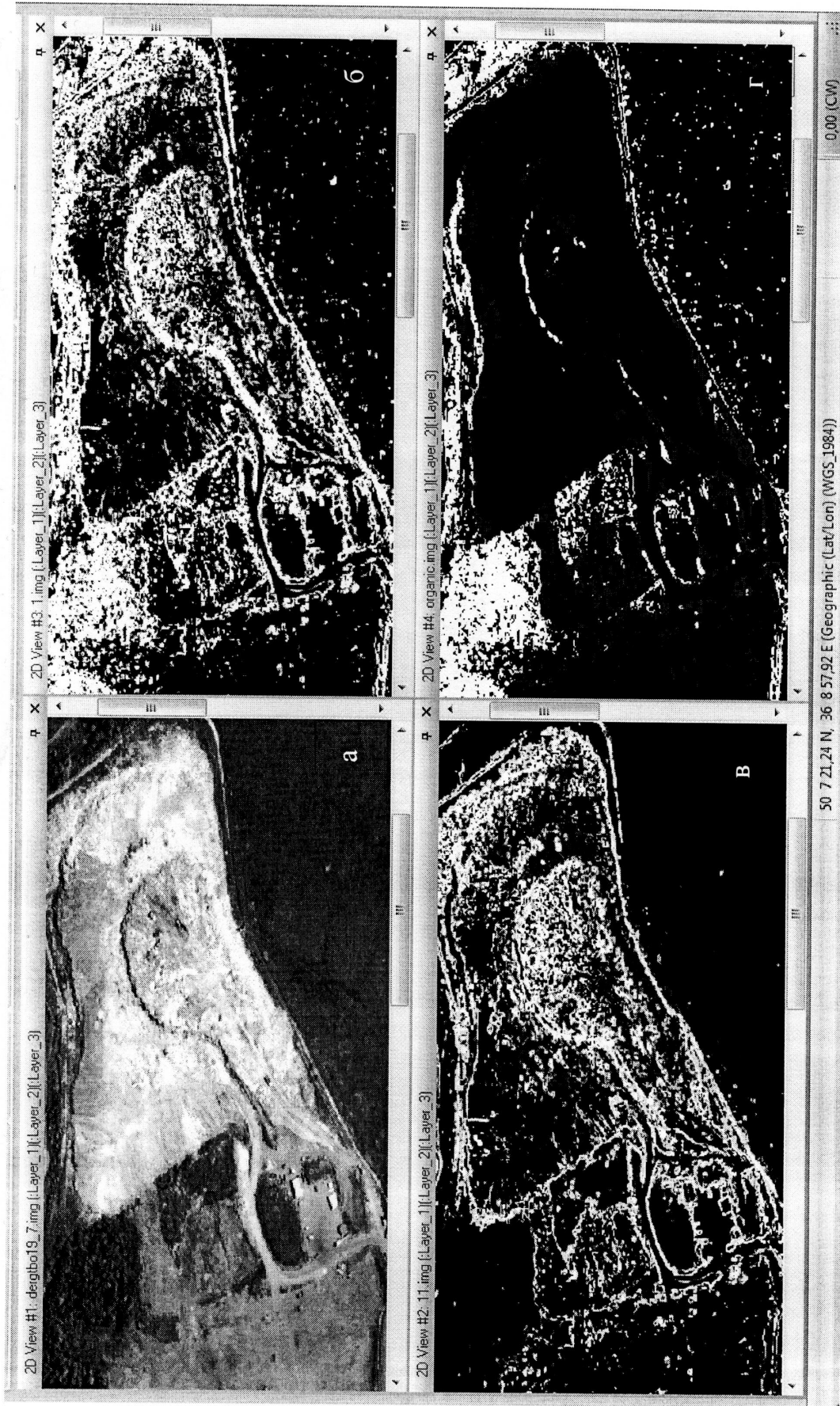


Рис. Б.9. Результат вычитания с территории всей свалки полигона со строительным мусором и породными массами: а – исходный снимок; б – полигон свалки; в – полигон строительным мусором и породными массами; г – полигон органической составляющей

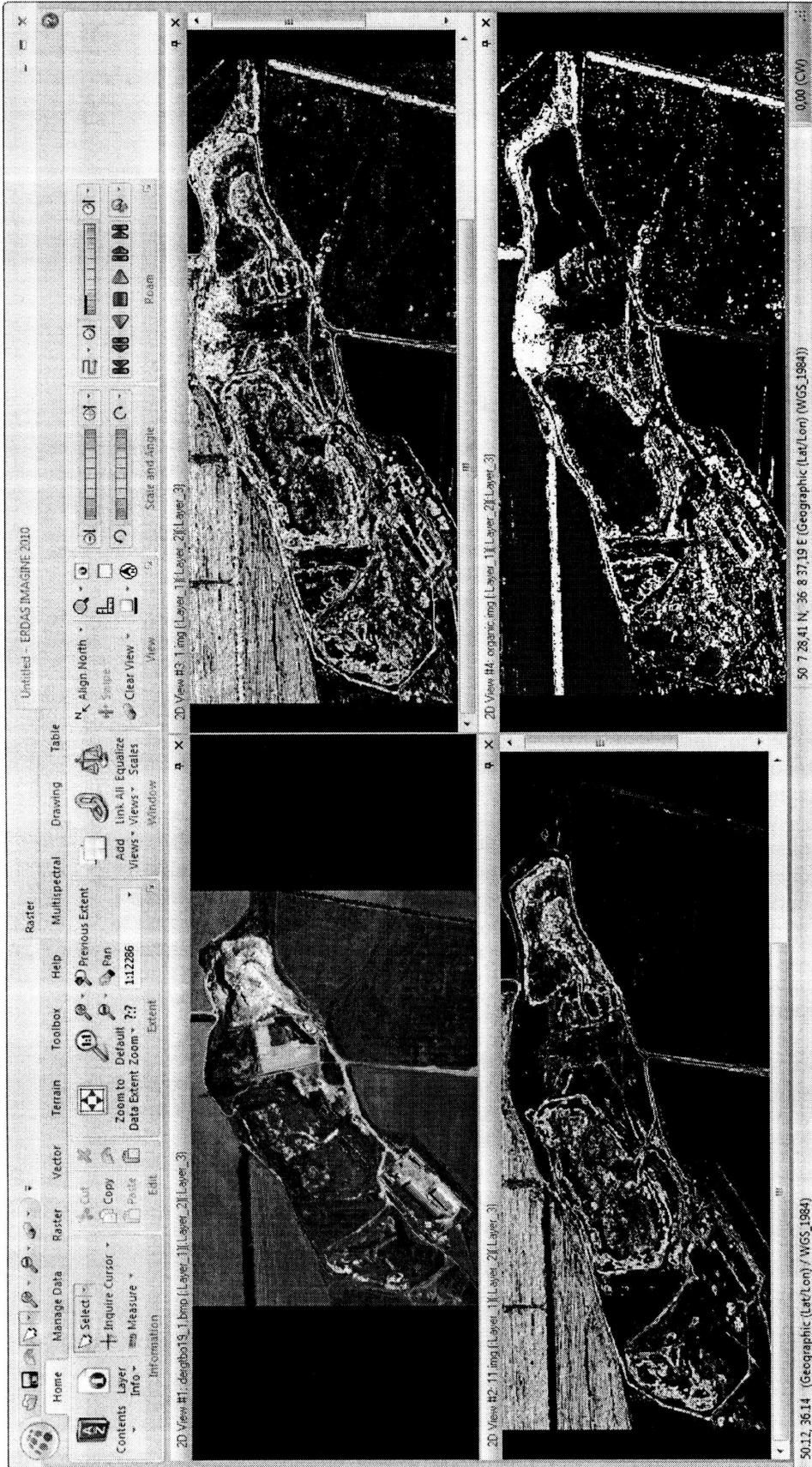


Рис. Б.10. Результат вычитания с территории всей свалки полигона со строительным мусором и породными массами: а – исходный снимок; б – полигон свалки; в – площадь, занятая строительным мусором и породными массами; г – площадь, занятая органической составляющей

ПРИЛОЖЕНИЕ В ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
та методичної роботи
Кременчуцького національного
університету

імені Михайла Остроградського,



В. В. Костін

« 03 » вересня 2015 р.

АКТ

використання в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи
Вамболь Віоли Владиславівни
«Наукові засади екологічно безпечної технології утилізації
вуглецевмісних відходів»

Комісія у складі: декана факультету природничих наук к.т.н., доц. Бахарсва В.С., завідувача кафедри екологічної безпеки та організації природокористування д.т.н., проф. Шмандія В. М., заступника завідувача кафедри екологічної безпеки та організації природокористування з наукової роботи к.т.н., доц. Святенка А. І., склала цей акт про використання у навчальному процесі результатів дисертаційних досліджень «Наукові засади екологічно безпечної технології утилізації вуглецевмісних відходів» та стверджує, що матеріали практично використовуються в навчальному процесі при викладанні нормативних дисциплін «Екологічна безпека» та «Загальна екологія та неоекологія» студентам денної форми навчання за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр».

На кафедрі екологічної безпеки та організації природокористування протягом 2013 – 2015 рр. за результатами даної дисертаційної роботи використовуються:

- в навчальній дисципліні «Загальна екологія та неоекологія» матеріали, в яких розглядаються сучасні способи поводження з відходами, вплив останніх на рівень екологічної безпеки, обґрунтування заходів щодо зниження цього впливу,

- в навчальній дисципліні «Екологічна безпека» матеріали, які містять обґрунтування створення екологічно безпечної технології утилізації, особливості використання плазмової газифікації для утилізації твердих вуглецевмісних відходів. до яких належать більшість промислових, медичних, сільськогосподарських і твердих побутових відходів.

Апробація результатів дисертаційних досліджень Вамболь В. В. у навчальному процесі засвідчила високий рівень наукового обґрунтування цих результатів, практичну значущість.

Декан факультету природничих наук
к.т.н., доц.



В.С. Бахарєв

Завідувач кафедри екологічної безпеки
та організації природокористування,
д.т.н., проф.



В. М. Шмандій

Заступник завідувача
кафедри екологічної безпеки
та організації природокористування
з наукової роботи, к.т.н., доц.

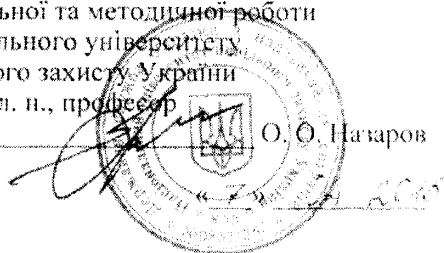


А. І. Святєнко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор
з навчальної та методичної роботи
Національного університету
цивільного захисту України
к. психол. н., професор

О. О. Назаров

**ДОВІДКА**

про використання в навчальному процесі результатів наукових досліджень за темою дисертаційної роботи «Наукові засади екологічно безпечної технології утилізації вуглецевмісних відходів»
Вамболь Віоли Владиславівни

Комісія у складі: начальника навчально-методичного відділу Національного університету цивільного захисту України к.т.н., доцента Морозова А.І., завідувача кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки Національного університету цивільного захисту України к.т.н., доцента Артем'єва С.Р., доцента кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки Національного університету цивільного захисту України к.х.н., с.н.с. Лобойченко В.М. склала довідку про те, що на кафедрі охорони праці та техногенно-екологічної безпеки Національного університету цивільного захисту України (м. Харків) впроваджені та використовуються результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи «Наукові засади екологічно безпечної технології утилізації вуглецевмісних відходів», при викладанні нормативних дисциплін «Техноекологія», «Організація та управління в природоохоронній діяльності» та вибіркової дисципліни «Промислова безпека» для здобувачів вищої освіти денної та заочної форм навчання за ступенем бакалавра, що навчаються у галузі знань «Природничі науки».

Апробація дисертаційних досліджень Вамболь В. В. засвідчила високий рівень наукового обґрунтування цих результатів, практичну значущість.

Начальник навчально-методичного відділу
к.т.н., доцент

А. І. Морозов

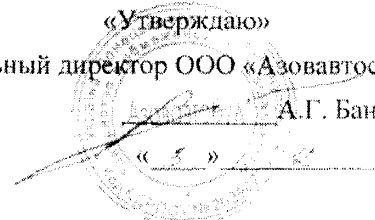
Завідувач кафедри
охорони праці та техногенно-екологічної безпеки
к.т.н., доцент

С. Р. Артем'єв

Доцент кафедри
охорони праці та техногенно-екологічної безпеки
к.х.н., с.н.с.

В. М. Лобойченко

«Утверждаю»
Генеральный директор ООО «Азовавтострой»
А.Г. Банников
« 5 » _____ 2009г.



АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Вамболь Виолы Владиславовны

Комиссия в составе зам. директора по производству Д.М. Стюарт-Томашевского и инженера по подготовке производства О.А. Трухмаева констатирует, что результаты работы Вамболь Виолы Владиславовны использованы в работах ООО «Азовавтострой» в акваториях морского порта в виде:

- методики расчета устройств создания мелкодисперсной водяной пыли над очагом пылевыведения;
- устройств, создающих мелкодисперсную водяную пыль над очагом пылевыведения.

Зам. директора по производству  Д.М. Стюарт-Томашевский

Инженер по подготовке производства  О.А. Трухмаев

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

ТОВ «Автрамат»

В.Ф. Івануха
В.Ф. Івануха

“ 17 ” 2015

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Вамболь Віоли Владиславівни

«Наукові засади екологічно безпечної технології утилізації твердих вуглецевмісних відходів»

Комісія у складі: директор Івануха В.Ф., головний інженер Медведєв А.В. склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи:

- спосіб утилізації твердих вуглецевмісних відходів;
- рекомендації з визначення параметрів технічних пристроїв і систем для охолодження відхідних газів, використання яких запобігає повторному формуванню високотоксичних речовин впроваджені на підприємстві ООО «Автрамат».

Аналіз поданих результатів дисертаційної роботи В. В. Вамболь показує, що вони мають актуальне значення в процесі поводження з відходами.

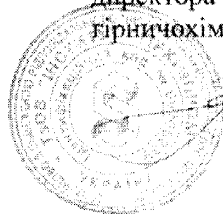
Директор
ТОВ «Автрамат»

В.Ф. Івануха
В.Ф. Івануха

Головний інженер
ТОВ «Автрамат»

А.В. Медведєв
А.В. Медведєв

Затверджую»
Перший заступник Генерального
директора ТзОВ «Інститут
Гірничохімічної промисловості»



Гелетій Г.М. Гелетій Г.М.

26 січня 2016 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Вамболь Віоли Владиславівни
«Наукові засади екологічно безпечної технології утилізації твердих
вуглецевмісних відходів»

Цим актом стверджується, що Вамболь В.В. передано у ТзОВ «ГІРХІМПРОМ» результати її дисертаційної роботи щодо удосконалення моделі автоматизованої системи контролю й управління технологічним процесом утилізації відходів шляхом введення додаткових параметрів контролю. Запропонована до впровадження удосконалена модель автоматизованої системи контролю й управління технологічним процесом утилізації відходів дозволяє здійснювати моніторинг всіх етапів процесу утилізації одночасно, що підвищує його екологічну безпеку.

Головний інженер

Ковалішин В.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
ТОВ «Універсалтехсервіс»
Труманів О.О.

25/03/2013 р.



АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Вамболь Віоли Владиславівни

Комісія у складі заступника начальника порту з охорони праці та екології Державного підприємства «Маріупольський морський торговельний порт» М. Г. Вавілова й інженера з підготовки виробництва І. О. Рудакова склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи стосовно способу утилізації твердих відходів реалізовані на підприємстві ТОВ «Універсалтехсервіс».

Аналіз поданих результатів дисертаційної роботи В. В. Вамболь показує, що вони мають актуальне значення в процесі поводження з відходами.

Заступника начальника порту
з охорони праці та екології
Державного підприємства
«Маріупольський морський
торговельний порт»

М. Г. Вавілов

Інженер з підготовки виробництва

І. О. Рудаков

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Головний інженер
ТД ВО «Машинобудівний завод»
Поліщук Д. В.

09 лютого 2016 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Вамболь Віоли Владиславівни
**«Наукові засади екологічно безпечної технології утилізації твердих
вуглецевмісних відходів»**

Комісія у складі: головного інженера Поліщука Д. В., заступника
головного інженера Галаган Д. С., замісника директора з виробництва
Чернявського А. В. склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи,
а саме:

– методики розрахунку пристроїв для створення рідинних завіс, що
запобігають розповсюдженню забруднювачів,

впроваджені на підприємстві ТД ВО «Машинобудівний завод».

Результати дисертаційної роботи В. В. Вамболь, що запропоновані до
впровадження, є актуальними й дозволяють підвищити ефективність захисту
навколишнього природного середовища.

Головний інженер

Поліщук Д. В.

Заступник головного інженера

Галаган Д. С.

Зам. директора з виробництва

Чернявський А. В.