

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»



На правах рукописи

Козырь Дмитрий Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ**

05.23.19 - Экологическая безопасность строительства и городского
хозяйства

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Высоцкий С. П.

Идентичность всех материалов диссертации заверяю
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.023.03



Т.С. Башевая

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ПО – породный отвал.

ГПО – горящий породный отвал.

ГПА – горнопромышленная агломерация.

БПЛА – беспилотный летательный аппарат.

СЗЗ – санитарно-защитная зона.

ПДК – предельно-допустимая концентрация.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	13
1.1 Характеристика воздействия ПО на окружающую среду горнопромышленных агломераций.....	13
1.2 Анализ основных причин самовозгорания	21
1.3 Оценка существующих методов контроля теплового состояния	30
1.4 Анализ газового состава выбросов горящих ПО	36
1.5 Выводы	43
РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ.....	45
2.1 Теоретические основы учета влияния основных факторов воздействия на дистанционный контроль теплового состояния ПО	45
2.2 Анализ влияния ослабления излучения атмосферой при дистанционном контроле температуры	49
2.2.1 Поглощение инфракрасного излучения атмосферой	49
2.2.2 Аэрозольное ослабление инфракрасного излучения.....	50
2.3 Влияние флуктуаций прозрачности атмосферы на фиксируемую энергетическую светимость очагов самовозгорания	53
2.4 Влияние ракурса съемки на фиксируемое излучение очагов самовозгорания .	57
2.5 Определение максимального расстояния дистанционного теплового контроля очагов самовозгорания.....	60
2.6 Модель влияния основных теплофизических характеристик при дистанционном контроле температуры	64
2.7 Выводы	67
РАЗДЕЛ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ МЕТОДЕ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ	69
3.1 Методика лабораторных исследований	69

3.2 Влияние расстояния тепловизионной съемки на фиксируемую энергетическую светимость	74
3.3 Влияние ракурса съемки на фиксируемую энергетическую светимость.....	89
3.4 Влияние скорости воздуха на динамику теплового состояния объекта исследования	92
3.5 Влияние формы очага тепловыделения на фиксируемую энергетическую светимость	95
3.6 Влияние поглощения атмосферой излучения объекта исследования на фиксируемую энергетическую светимость	96
3.7 Анализ влияния расстояния дистанционного контроля температуры на температурный контраст между объектом тепловыделения и тепловизором.....	99
3.8 Выводы	101
РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПОРОДНЫХ ОТВАЛАХ ШАХТ ДОНБАССА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ.....	103
4.1 Методика проведения натурных исследований	103
4.2 Натурные исследования температурного состояния ПО	108
4.3 Влияние расстояния дистанционного контроля температуры на температурный контраст	119
4.4 Процессы окисления в зонах эрозии	122
4.5 Исследование выбросов вредных веществ при окислении горных пород и определение стадии их горения.....	124
4.6 Исследование процессов генерации выбросов токсичных газов	131
4.7 Выводы	138
РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ	140
5.1 Влияние стадий метаморфизма угля на расстояние дистанционного контроля и эмиссии оксидов углерода	140
5.2 Обоснование периодичности теплового контроля и оценка его стоимости...	144

5.3 Рекомендации по дистанционному контролю теплового состояния ПО	148
5.4 Выводы	152
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	154
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	156
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ И СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	186
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫБРОСОВ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОДНОГО ОТВАЛА Ш. ИМ. М.И. КАЛИНИНА.....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ АТТЕСТАЦИИ ЛАБОРАТОРИИ...	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время на территории Донецкого региона насчитывается более 600 породных отвалов, из которых около 140 горящих. Горение ПО с выбросом пыли и токсичных газов, самовозгорание породы, обвалы и даже взрывы горящих породных отвалов несут угрозу жизни людей и наносят существенный материальный ущерб. В Донецком регионе значительная часть всех ПО находится в черте горнопромышленных агломераций. В ряде случаев в пределах их санитарно-защитной зоны находится селитебная территория. Так, например, при анализе результатов расчета рассеивания ГПО шахты «Октябрьский рудник» в г. Донецке зарегистрировано превышение санитарных нормативов на границе СЗЗ по загрязняющему веществу - сероводороду. Зона влияния ГПО достигает 10 км. Близость селитебной территории к ГПО оказывает негативное воздействие на здоровье населения - показатели общей заболеваемости в районе размещения таких отвалов, превышают показатели в районе отдаленном от них почти в 2 раза.

С целью раннего выявления очагов самовозгорания и своевременного принятия мер по предупреждению горения пород, необходимо проводить контроль их теплового состояния. В настоящее время температурный контроль, в соответствии с действующей «Инструкцией по предупреждению самовозгорания, тушению и разборке породных отвалов», проводится с помощью контактных термометров на глубинах от 0,5 до 2,5 м. При использовании контактной методики, из-за редкой сети точек измерения температуры, невозможно достоверно определить количество, форму и площадь очагов самовозгорания. Кроме этого, из-за недоступности к очагам горения отсутствует возможность измерения их температуры контактным способом.

Для выбора оптимального комплекса мероприятий по предупреждению и ликвидации пожаров, снижению выбросов в атмосферу вредных веществ необходим своевременный мониторинг стадий развития процесса горения отвальных пород с помощью дистанционных методов. С развитием пожара

затраты на его тушение значительно возрастают. Поэтому важным является своевременно выявить, локализовать и ликвидировать очаг пожара. Отсутствие научно обоснованных и законодательно утвержденных современных методов, позволяющих оперативно, точно и безопасно определить тепловое состояние ПО и обеспечить своевременное выполнение требований экологической безопасности в ГПА обуславливает актуальность проведения исследований по усовершенствованию систем мониторинга экологической безопасности ГПО с использованием дистанционных методов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы мониторинга экологической безопасности ПО рассмотрены в работах, ведущих в данной отрасли, ученых: Анупмы Пракаш (Anurma Prakash), Грекова С.П., Зборщика М.П., Зубовой Л.Г., Клаудии Куенцер (Claudia Kuenzer), Костенко В.К., Ксавье Квероль (Xavier Querol), Манфреда Вуттке (Manfred W Wuttke), Осокина В.В., Пашковского П.С., Проскурни Ю.А., Саранчука В.И. и т.д. Существующий опыт использования дистанционных методов мониторинга в различных отраслях свидетельствует об их перспективности для обеспечения экологической безопасности ПО. Однако в настоящее время, к сожалению, отсутствуют научно обоснованные методики контроля уровня экологической безопасности ПО с использованием дистанционных методов, а существующая научно-практическая база недостаточна для их использования.

Цель исследования: теоретическое и экспериментальное обоснование повышения уровня экологической безопасности ПО горнопромышленных агломераций за счет совершенствования систем мониторинга их теплового состояния с использованием дистанционных методов.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- **обосновано** применение дистанционных методов мониторинга теплового состояния породных отвалов для повышения уровня экологической безопасности горнопромышленных агломераций;
- **исследованы** и оценены уравнением критериального вида основные теплофизические характеристики при дистанционном контроле температуры;

- **установлено** влияние расстояния, ракурса тепловизионной съемки, формы очагов самовозгорания породных отвалов и степени метаморфизма на фиксируемую дистанционными методами энергетическую светимость;

- **установлена** приоритетность направлений сокращения эмиссий загрязнителей на поверхности горящих ПО;

- **обоснован** механизм образования токсичных компонентов выбросов при горении ПО;

- **определены** предельные расстояния дистанционного контроля теплового состояния ПО и его периодичность;

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Впервые **обоснован** дистанционный метод мониторинга теплового состояния поверхности ПО с различной степенью экологической опасности и оптимальной периодичностью (1 раз в месяц) при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

2. Впервые **получено** уравнение в критериальном виде, определяющее влияние теплофизических характеристик отвальной массы и атмосферы на отвод тепла от очага самовозгорания на отвалах горной породы.

3. **Установлено**, что температурный контраст между очагом самовозгорания и тепловизором обратно пропорционален расстоянию съемки.

4. **Обоснован** метод определения стадии горения ПО по соотношению концентраций диоксида углерода к оксиду углерода и степени использования кислорода.

5. **Раскрыт** процесс генерации сероводорода на поверхности ГПО, обусловленный реакцией сернистой кислоты с пиритом породы. При этом установлено, что увеличение относительной влажности атмосферы сопровождается повышением степени генерации сероводорода.

Объект исследования – загрязнение атмосферы породными отвалами горнопромышленных агломераций.

Предмет исследования – исследование процессов выделения вредных веществ при горении отвальной массы, оценка теплового состояния породных отвалов и контроль их экологической безопасности.

Практическое значение полученных результатов.

1. Внедрение дистанционных методов контроля теплового состояния ПО с учетом влияния основных факторов воздействия на дистанционный контроль позволит **повысить** уровень их экологической безопасности за счет своевременного предотвращения самовозгорания.

2. **Установлена** периодичность теплового контроля очагов самовозгорания на ПО – 1 раз в месяц.

3. Экспериментально **установлено**, что выбросы в атмосферу от низкотемпературных зон эрозии на поверхности ПО, занимающие площадь 20-25% поверхности отвала, составляют до 50% от общего вклада в загрязнение по всем загрязняющим веществам.

4. Применение дистанционных методов контроля температуры для температурной съемки ПО **сокращает** затраты на их выполнение в 5 раз по сравнению с действующей технологией.

5. Результаты диссертационного исследования (результаты лабораторных и натурных исследований, уравнение критериального вида, периодичность контроля) включены в Программу экологической безопасности ДНР (акт внедрения №1 от 7.05.2018 г), в Программу развития ОП «Шахта имени С.М. Кирова» ГП «Макеевуголь», в методику контроля теплового состояния породных отвалов, разработанную НИИГД «Респиратор». Основные научные разработки автора используются в учебном процессе ГОУ ВПО «ДонНТУ» для студентов направлений 20.03.01 «Техносферная безопасность», 05.03.06 «Экология и природопользование» (Приложение А).

Методы исследования – при выполнении диссертационной работы был использован комплексный метод исследования: анализ и обобщение информационных источников; теоретические исследования процесса дистанционного контроля температуры; моделирование изменения основных

теплофизических характеристик при дистанционном контроле температуры; экспериментальные исследования влияния расстояния, ракурса тепловизионной съемки, формы очага самовозгорания на фиксируемую, с помощью дистанционных методов температуру; натурные исследования эмиссий токсичных газов с поверхности отвала; использование методов математической статистики для проверки достоверности полученных результатов. Используемые в лабораторных и натурных исследованиях тепловизоры метрологически обеспечены. Относительная погрешность измерения температуры тепловизором - 2% (паспортные данные).

Для измерения концентраций загрязняющих веществ использовался газоанализатор ОКСИ-5М (свидетельство о поверке №84026/1 до 05.02.19). Относительная погрешность измерения концентраций токсичных газов - 5%.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований влияния расстояния, ракурса съемки, формы очагов самовозгорания и степени метаморфизма углей на дистанционный мониторинг экологической безопасности ПО.

2. Уравнение критериального вида, описывающее влияние теплофизических характеристик породы и атмосферы на отвод тепла от очагов самовозгорания на ПО при дистанционном контроле их теплового состояния.

3. Метод оценки уровня экологической безопасности ПО.

Личный вклад соискателя. Совместно с научным руководителем определена цель и поставлены задачи исследования; проведен обзор публикаций по современному состоянию мониторинга экологической безопасности отвалов горных пород; подготовлены основные публикации по теме диссертационной работы; проведены лабораторные и натурные исследования основных параметров дистанционного контроля теплового состояния ПО, а также выбросов токсичных газов при их горении; усовершенствована система мониторинга теплового состояния поверхности ПО с использованием БПЛА.

Степень достоверности результатов и апробация результатов диссертационной работы. Достоверность результатов обеспечена хорошей сходимостью результатов лабораторных и натурных исследований.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на: II международном научно-практическом семинаре «Повховские научные чтения» (г. Донецк, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Вентиляція підземних споруд та промислова безпека в ХХІ столітті» (г. Донецк, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Проблеми екологічної безпеки» (г. Кременчуг, 2014 г.); VIII научно-теоретической конференции «Екологія людини» (г. Житомир, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды» (г. Белгород, 2015 г.); Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); I международной научно-практической конференции «Экологическая ситуация в Донбассе: проблемы безопасности и рекультивации повреждённых территорий для их экономического возрождения» (г. Донецк, 2016 г.); Международной научно-технической интернет-конференции «Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов» (г. Тула, 2017 г.); Всероссийской научной конференции «Проблемы социально-экономической географии и природопользования» (г. Ростов-на-Дону, 2017 г.); VII международной научной конференции «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях» (г. Белгород, 2017 г.); XII Международной конференции аспирантов и студентов «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» (г. Донецк, 2018 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 18 научных работах, общим объемом 4,20 п.л., лично автором – 3,42 п.л., в том числе 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденный ВАК МОН Украины, 3 работы – в рецензируемых научных изданиях, утвержденных перечнем ВАК

МОН ДНР, 13 работ – в сборниках трудов международных и региональных научно-практических конференций а также других изданий (6 – в изданиях, индексируемых в базе данных РИНЦ (РФ)).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Материалы диссертации изложены на 192 страницах, в том числе на 124 страницах основного текста, 31 полных страницах с рисунками и таблицами, 19 страницах списка литературных источников, 18 страницах приложений.

РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1 Характеристика воздействия ПО на окружающую среду горнопромышленных агломераций

В настоящее время в Донецкой Народной Республике добывается более 5 млн. тонн угля в год, при этом на поверхность извлекается огромное количество вскрышных и вмещающих пород, среди которых также встречаются обломки угля. Вскрышные и вмещающие породы складировются на поверхности в ПО. Также в отвалах складировается шлам и ил от очистки выработок и водосборников, отходы обогащения, порода от восстановительных работ в аварийных выработках.

Количество, выдаваемой из шахт породы, зависит от условий залегания угольного пласта (мощности, угла падения, наличия геологических нарушений, сближения пластов), способа разработки (взрывным способом, отбойными молотками или комбайнами) и системы разработки [1]. Количество породы, выдаваемой из угольных шахт Донбасса, составляет более 20% к добываемому углю [2]. Сегодня проблема отходов актуальна для республик Донбасса — ЛНР и ДНР. Так, например, на территории ЛНР находится более 1,5 млрд т промышленных отходов. Нагрузка по отходам достигает 110 тыс. т/км² [3].

Отвальная масса является механической смесью горных пород, вмещающих угольный пласт, сростков угля с породой и угля, потерянного при добыче и обогащении. По минералогическому составу выдаваемая из шахты на поверхность порода состоит из глинистых, песчано-глинистых, песчанистых и углистых сланцев, песчаников, известняков с включением угля, сернистого колчедана и сростков породы с углем. Соотношение различных минералов определяется преимущественно составом пород, по которым осуществляются подготовительные выработки, а также кровлей и почвой разрабатываемых пластов. Породы различны по дисперсности, имеют размер от глинистых частиц

до глыб [4]. Порода, выдаваемая из шахт, поступает главным образом от проведения горных выработок, от их ремонта, восстановления и из очистных забоев. Материалы, подвергаемые горению, представлены в отвальной массе в виде чистого угля, углистых сланцев, аргиллитов, сростков угля с породой, лесоматериалов и пирита. Уголь поступает в отвалы вместе с пустой породой от проведения выработок, пройденных по углю и по породе. Содержание угля в ПО увеличивается от мелких классов к крупным. Отвалы шахт Донбасса содержат около 7,8 % угля крупностью до 1 мм [2].

Исследования отвальной массы более 850 ПО шахт Донбасса показали, что в отвальной массе 14,4% отвалов содержится более 5% горючих соединений серы (пирит); 26,6% отвалов – 3-5% пирита; 22,3% отвалов – 1,5-3% пирита и в остальных – менее 1,5% пирита.

Содержание влаги в шахтной породе составляет в среднем 1,9%, для отвальной массы обогатительных фабрик - 2,2%. Саранчуком В.И. [2] установлено, что повышение влажности отвальной породы приводит к увеличению её теплопроводности. Зольность отвальной массы шахт составляет в среднем 65,6%, обогатительных фабрик – 72,6%. На отвалах шахт наблюдается увеличение пористости при изменении степени метаморфизма добываемых углей от Г до К, затем она снижается к антрацитам [2].

В настоящее время более 74 % отвалов Донбасса представлены конусными ПО высотой до 100 метров, каждый из них занимает до 10 га ценных земель горнопромышленных агломераций [2].

В Донецком регионе 80% всех ПО находится в черте ГПА, зачастую в пределах санитарно-защитной зоны находится жилье. Мероприятия по переселению населения жилой застройки, находящейся в санитарно-защитной зоне породных отвалов, не проводятся.

Размеры зон влияния ПО в несколько раз превышают их площади. Остро стоит проблема горящих породных отвалов, они зафиксировано практически на всех континентах земного шара (рис.1.1) [5, 6].

В экологически вредных и опасных для здоровья и жизни условиях вынуждены находиться жители ГПА, проживающие в пределах зоны влияния горящих породных отвалов.

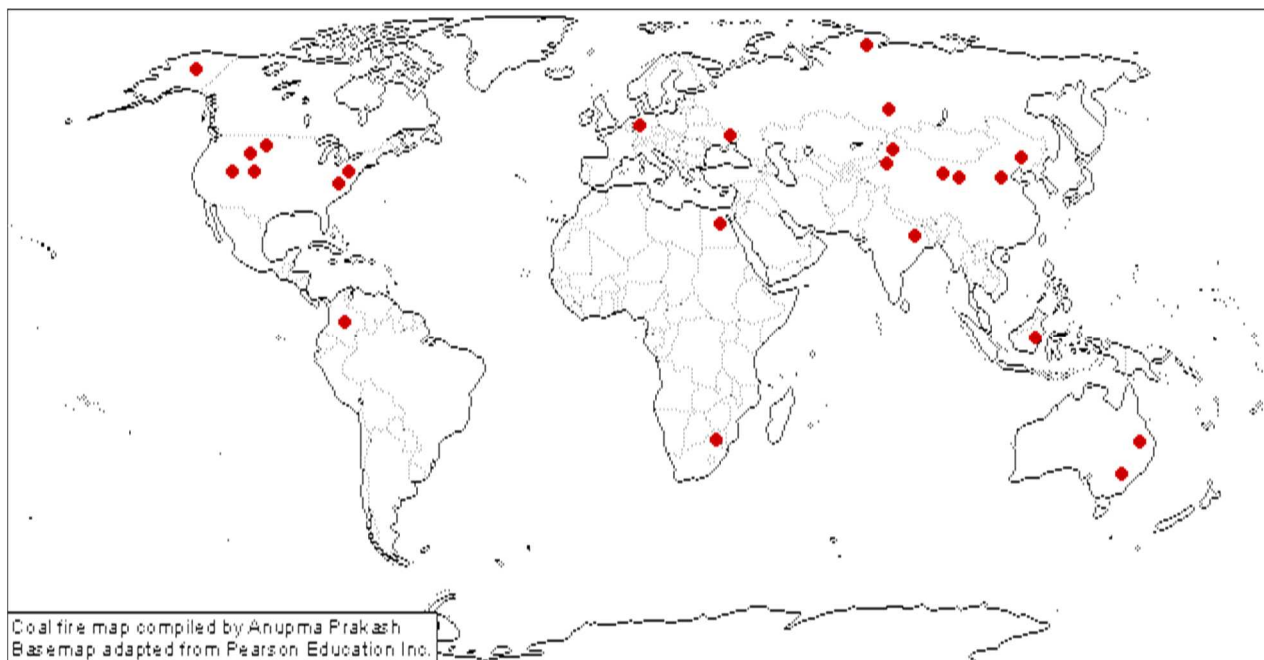


Рис. 1.1. Зоны влияния горящих породных отвалов (по данным Anupma Prakash, 2007 г. [5])

Горная промышленность Донбасса вносит негативный вклад в изменение рельефа ГПА. Проведение подготовительных выработок и выемка угля приводят к тому, что вышележащие породы проседают с образованием серии трещин.

Движение горных пород выше зоны трещин проявляется на поверхности мульдой проседания, которая иногда сопровождается образованием провальных воронок. Величина проседания поверхности в среднем колеблется в пределах 0,5 - 1,2 м [7].

На ПО угольных шахт и обогатительных фабрик происходят аварии, выражающиеся в сдвиге и стремительном перемещении больших объемов породы вниз по откосу отвала. В условиях ГПО такие перемещения сопровождаются, кроме механического, еще и тепловыми воздействиями раскаленных пород, что делает их особенно опасными.

Отвалы высотой более 40 м склонны к большим деформациям. Деформации ПО связаны с превышением несущей способности природного основания, которое в 80% случаев представлено почвами (песок, глины, суглинки, суспензии, ил). Эти основания имеют большую пористость, просадку и меняют в больших пределах несущую способность в зависимости от влажности. Песчаный грунт при увеличении на него нагрузки сжимается в основном за счет разрушения острых ребер и углов в зернах и их перемещений в поры. Из-за большой водопроницаемости песка процесс отжима из него воды не ограничен скоростью фильтрации, поэтому в слое песчаного грунта основная часть усадки происходит практически мгновенно после увеличения нагрузки на него. Зачастую, инженерные мероприятия по увеличению несущей способности оснований не проводятся, поэтому нагрузки могут приводить к потере устойчивости и деформации отвалов.

Природные возвышенности дополняются антропогенными возвышенностями в виде ПО разной формы. Добыча угля, откачка шахтных вод, отсыпка породы в отвалы увеличивают крутизну склонов рельефа, способствуют техногенному развитию эрозии и оползней. Исследователями установлено, что в результате водной эрозии из ПО в среднем смывается до $400 \text{ м}^3/\text{га}$ в год породы, при этом с южного склона смыв в 2 - 3 раза больше [4].

Дефляция ПО оказывает негативное влияние на окружающую среду. Установлено, что воздействие ветра на ПО Луганщины приводит к потенциальному выносу до 157 т/год породы с гектара поверхности отвала [1].

Наибольшее загрязнение характерно для периода отсыпки отвала: от подножия отвала до границы СЗЗ плотность загрязнения снижается от 550 до 1 т/га, а на расстоянии 1000 м она равна 80 кг/га, что в 35 раз больше чем при дефляционном загрязнении [1]. ПО также влияют на изменение климата. Известно, что в урбанизированном регионе движение горизонтальных воздушных масс уменьшается на 25% по сравнению с прилегающей территорией. Выбросы токсичных газов и пыли при горении ПО определенное время находятся в атмосфере, способствуя конденсации водяного пара с образованием облаков и

туманов. Установлено, что выбросы загрязняющих веществ приводят к увеличению количества осадков на 5 - 10% и количества туманов в 2 - 5 раз [1]. Наибольшую опасность для жителей горнопромышленных агломераций представляют ГПО. В.И. Саранчуком установлено, что в угледобывающих районах ГПО выбрасывают в сутки в среднем 9,758 т СО; 154,170 т - СО₂; 1,476 т - SO₂; 0,399 т - H₂S и 0,072 т NO + NO₂ [2].

В глобальном масштабе выбросы большого количества парниковых газов из ГПО могут вносить вклад в изменение климата и экосистем. В региональном и локальном масштабе выбросы оксидов углерода, оксидов азота, сернистого ангидрида, сероводорода, взвешенных частиц и микроэлементов могут вызывать ухудшение здоровья населения. Такие летучие элементы как мышьяк, фтор, ртуть, селен часто встречаются в залежах угля, а при возгорании они могут улетучиваться в атмосферу, а затем вдыхаться, или адсорбироваться на растениях и передаваться затем по пищевым цепям [8].

В настоящее время на территории Донецкой Народной Республики находится около 600 ПО, из них горящих - около 140. Для оценки загрязнения атмосферного воздуха выбросами горящего породного отвала проведен расчет рассеивания загрязняющих веществ ГПО шахты «Октябрьский рудник». Расчет рассеивания проводился с использованием программы ЭОЛ-2000 и данных о расчетных выбросах отвала. Расчет рассеивания проводился без учета фоновое загрязнение атмосферы. В санитарно-защитной зоне ПО шахты «Октябрьский рудник» (500 м). Ближайшая селитебная территория находится на востоке на расстоянии 330 м.

Проведенный расчет рассеивания выбросов загрязняющих веществ при горении ПО шахты «Октябрьский рудник» показал превышения ПДК на границе СЗЗ и жилье по сероводороду: 2,92 ПДК на СЗЗ, 3,06 ПДК на жилье; по суммарному действию сероводорода и диоксида серы: 3,13 ПДК на СЗЗ, 3,82 ПДК на жилье (рис. 1.2). Зона влияния ПО определяется совместным влиянием сероводорода и диоксида серы и составляет около 10 км (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Рассеивание сероводорода при горении ПО шахты «Октябрьский рудник» (по состоянию на 2013 год)

Расчет рассеивания показал что, ГПО шахты «Октябрьский рудник» оказывает негативное воздействие на жителей горнопромышленных агломераций - суммарное действие сероводорода и диоксида серы на жилье составляет 3,82 ПДК.

По данным исследователей, показатели общей заболеваемости населения ГПА в районе размещения ГПО превышают показатели в районе отдаленном от породного отвала в 1,96 раз. Заболеваемость детей, проживающих в районе размещения ГПО в 1,5 раза выше, чем по городу. Врожденные аномалии развития обнаружены у подростков, проживающих в районе горящего террикона на 18% чаще, чем в среднем по городу [9].

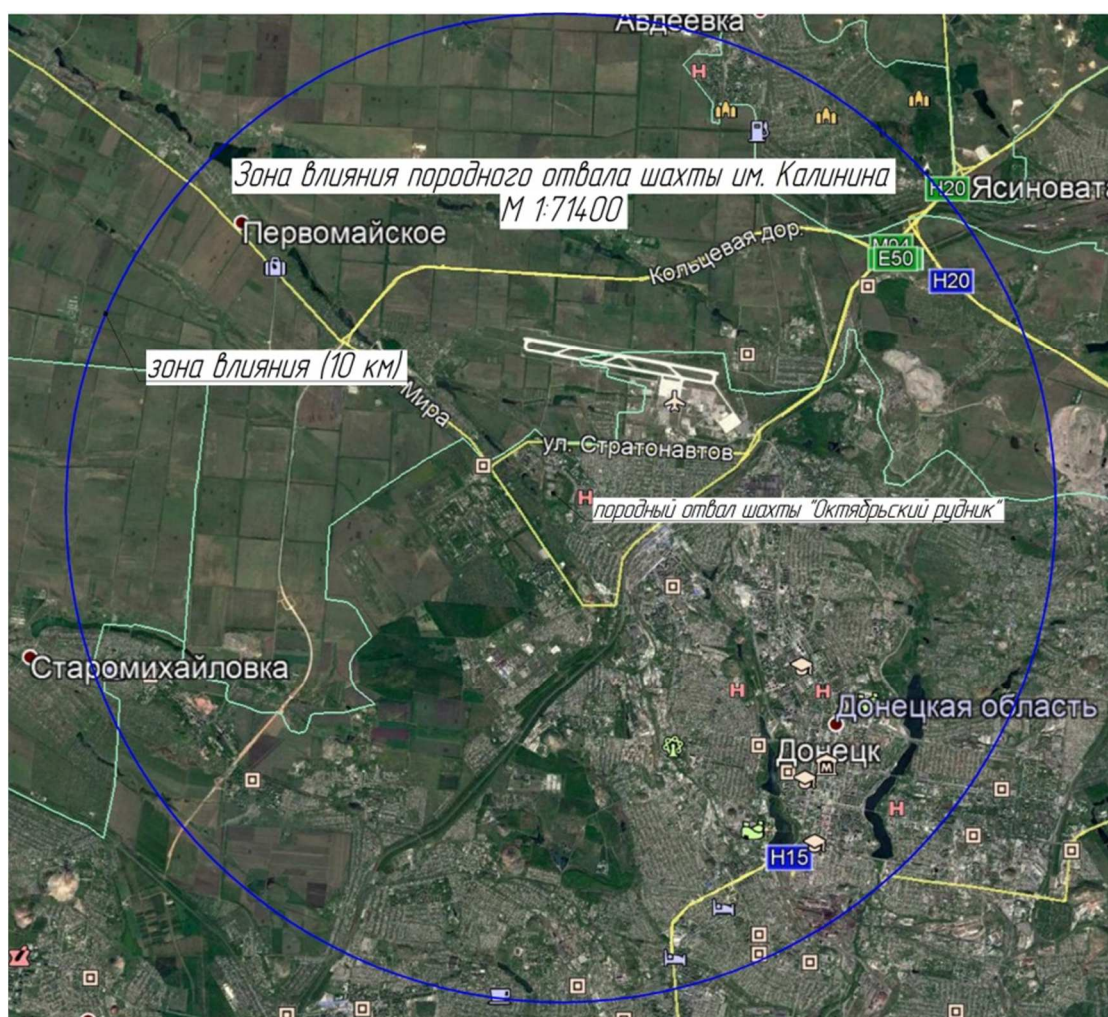


Рис. 1.3. Зона влияния горящего ПО шахты «Октябрьский рудник» (10 км)

Исследователями установлено, что отвалы после окончания эксплуатации горят еще от 7 до 12 лет. Такой длительный срок горения отвалов обусловлен тем, что в них накоплено большое количество горючих материалов. Исследованием состава отвальной массы по 25 шахтам антрацитового района Ростовской области установлено, что содержание в ней угля составляет до 20% [2].

Горящие действующие ПО представляют большую опасность для обслуживающего персонала. На таких отвалах могут происходить случаи гибели людей в результате отравления газами и попадания в очаги горения с температурой порядка 800-1000⁰С.

При определении теплового состояния на ГПО должен быть предусмотрен комплекс мер для безопасного передвижения людей. На поверхности отвала

очаги горения зачастую покрыты тонким слоем породы, которая может легко обрушиться при движении по ней человека. Часто такие очаги горения встречаются при контакте с рыхлыми породами отвала.

По мере удаления фронта пожара поверхностные очаги на склонах отвала постепенно исчезают, и температура поверхностного слоя снижается. Пожар на этой стадии идет внутрь отвала. Одновременно на поверхности отвала начинается горение газов, выходящих из глубин отвала. На следующих стадиях отмечается отсутствие поверхностных очагов. Прекращается образование вредных газов, хотя температура в глубине может оставаться большой за счет ранее накопленного тепла. После прекращения эксплуатации отвалов очаги горения на поверхности быстро исчезают. На поверхности недействующих отвалов горят только газы, выходящие из глубинных очагов горения [10].

Известно, что взрывы на горящих отвалах часто сопровождаются различными деформациями - оползнями, обрушениями, обвалами и др. В большинстве случаев эти явления наблюдаются во время обильных дождей, что способствуют возникновению деформаций и вызывает образование водорода. Есть все основания предполагать, что в таких случаях именно деформации отвалов приводят к взрывам. При движении больших масс породы, высвобождаются значительные массы горючих газов, которые заполняют пустоты и полости отвала. Смешиваясь с атмосферным воздухом, эти газы образуют взрывчатую смесь, а это условие для сильного взрыва. Постепенный же выход горючих газов на поверхность отвала также приводит к возникновению слабых взрывов, которые могут оставаться незамеченными.

Горение ПО с выбросом огромного количества загрязняющих веществ, самовозгорание, взрывы и обвалы несут угрозу жизнедеятельности людей. Так в 1996 г. в городе Димитрове — взрывом террикона был уничтожен целый жилой поселок, погибли более 60 человек

Осадки, достигая земли в виде дождя, снега или града, растворяют взвешенные вещества и обогащаются солями. Установлено, что средняя минерализация атмосферных осадков в Донбассе высока - до 60 мг/л [11].

Содержание солей зависит от запыленности атмосферы. В ионном составе осадков преобладают анионы оксидов серы (до 12,9 мг/л) и катионы кальция (до 3,4 мг/л) [12]. По данным исследователей, значение pH атмосферных осадков находится в пределах 5 – 6 [13]. Основными ингредиентами, загрязняющими поверхностные водные объекты, являются взвешенные вещества и токсичные металлы - железо и марганец. В стоках почти всех шахт нефтепродукты, фенолы, сероводород, никель, хром [14].

ГПО, выбрасывающие в атмосферу токсичные газы и пыль, косвенно загрязняют и поверхностные водоемы. По данным Ю.А. Проскурни, содержание многих элементов (торий, германий, хром, свинец, ртуть, германий, медь, цезий, свинец, висмут, ртуть, хром, мышьяк, цинк) находящихся в породах терриконов, превышает кларки осадочных пород [15].

Установлено повышенное содержание в горелых породах (до 2 раз) таких элементов - лантан, медь, галлий, цинк, германий, торий, олово (для песчаников) висмут, хром, торий относительно содержания аналогичных элементов в неизмененных породах.

Известно, что пиритизованный уголь богат ураном. В угле он в основном представлен оксидом урана, который при взаимодействии с кислотами растворяется и приводит к повышению радиоактивности породных отвалов [16].

1.2 Анализ основных причин самовозгорания

Самовозгорание – это процесс перехода химической системы из низкотемпературного состояния в состояние горения вследствие образования тепла внутри самой системы без притока тепла извне [2].

Составными частями процесса самовозгорания являются химические и биохимические реакции, приток кислорода и теплофизические соотношения между системой и окружающей средой.

Наиболее склонны к самовозгоранию - конусные отвалы. В естественных условиях самовозгораются бурые и каменные угли, антрациты, углесто-

глинистые породы, горючие сланцы, сернистые руды, торф. В условиях Донбасса, например, наиболее склонны к самовозгоранию породы, являющиеся отходами углеобогащения.

Несмотря на наличие общих закономерностей процесса окисления, единой теории, характеризующей причины и механизм самовозгорания, нет. Существуют пиритно-железная, микробиологическая, а также теория уголь-кислородных комплексов [17].

Процесс самоокисления углепородного массива зависит от ряда внешних и внутренних факторов, среди которых наибольшее значение, помимо метаморфизма углей и петрологического состава, имеют такие факторы, как сернистость и влажность исходного материала, условия их образования, способ добычи, температура окружающей среды, структура разрабатываемых пластов, размер и форма отвалов, газовая среда и т.д. (табл. 1.1) [18, 19, 20, 21].

Табл.1.1. Основные факторы, влияющие на самовозгорание ПО

Внутренние факторы	Внешние факторы (атмосферные, геологические)
Пирит	Температура
Влажность	Влажность
Размер частиц и площадь поверхности	Барометрическое давление
Петрографический состав	Концентрация O_2
Химические компоненты	Бактерии
Минеральные вещества	Скорость воздушного потока

Каменные угли состоят из следующих минералов – дюрена, витрена, фюзена и кларена, в зависимости от наличия или высокого содержания одного из этих минералов наблюдается повышение склонности к самовозгоранию. Витрен при температуре до 100°C поглощает меньше кислорода, чем фюзен. Повышенная реакционная способность высокосольных углей и углистых пород к окислителям объясняется тем, что угольное вещество этих компонентов отвальной массы представлено в основном фюзеном, который характеризуется наиболее лёгкой

окисляемостью при низких температурах по сравнению с другими ингредиентами ископаемых углей [22, 23, 24].

Исследователями установлено, что изменение стадии метаморфизма влияет на химическую активность углей. Так, из-за уплотнения молекулярной структуры угля, сорбция углем кислорода воздуха с увеличением стадии метаморфизма уменьшается. Самые малые значения константы сорбции характерны для углей самой большой стадии метаморфизма (угли марки ОС и К) [25].

Одним из основных факторов самовозгорания является свободный доступ кислорода внутрь тела отвала [26, 27, 28, 29].

При складировании в отвал порода имеет температуру, незначительно отличающуюся от температуры воздуха в момент разгрузки. Сразу после попадания в отвал начинается окисление горючих веществ отвальной массы и её температура повышается. Темп нагревания породы зависит от её химической активности, теплофизических свойств, воздухопроницаемости и теплоотдачи в окружающую среду. В зависимости от этих факторов процесс самонагревания до 70-80⁰С длится от двух месяцев до двух лет. В этот период температура пород на расстоянии 6-10 м от границы откоса по глубине распределяется равномерно. После достижения температуры 70-80⁰С, независимо от температуры воздуха, в отдельных местах отвала на глубине 2-3 м от поверхности, куда поступает кислород, образуются очаги самовозгорания. Температура пород в них в течение 10-15 суток достигает температуры воспламенения, и образуются отдельные очаги горения, которые в связи с недостаточным количеством кислорода перемещаются в сторону откоса. По мере выгорания породы очаги горения перемещаются вдоль откоса, увеличивая горящую поверхность [2].

Процесс самовозгорания активизируется в присутствии влаги, в особенности при наличии стадий высыхания и увлажнения, так как процессы испарения воды увеличивают пористость породного массива [30, 31, 32].

Исследователями экспериментально установлено отсутствие химического взаимодействия сухого угля с сухим воздухом. Сухой уголь при 33⁰С сорбирует кислород из воздуха, при повышении температуры до 49⁰С происходит

десорбция кислорода, химическое взаимодействие начинается с 70⁰С. Уголь естественной влажности (2%) уже при температуре 30⁰С вступает в химическое взаимодействие с кислородом воздуха. По мере испарения влаги и освобождения поверхности, интенсивность поглощения кислорода возрастает [2, 33, 34].

Скорость окисления угля возрастает с ростом внешней температуры. Уголь исходно, не склонный к возгораниям, при перемещении его в отвалы в условиях теплого климата, может загораться. Так, на отвалах в южной части Кузбасса, по данным исследователей, температура поверхности на южных склонах в жаркие дни может достигать 41-42⁰С, что, несомненно, стимулирует активизацию процессов окисления [35]. Исследователями установлено, что нагревание антрацитов до 50⁰С при свободном доступе воздуха в течение 2–3 ч увеличивает их активность к окислителям, что способствует развитию процессов, приводящих к самовозгоранию.

Теплопроводность угля также может влиять на возможность возникновения самовоспламенения, так как уголь выполняет функцию передачи и аккумуляции тепла, получаемого при окислении. Высокие значения теплопроводности характерны в случаях высокой концентрации минеральных веществ в составе углей, так как они быстрее рассеивают тепло [30, 36]. Количество минеральных веществ в значительной степени различается в зависимости от сорта и условий добычи. Среднее содержание природной золы в большинстве угольных пластов Донбасса находится в пределах 7-20 %.

Из-за увеличения площади окисления, процессы окисления угля усиливаются на мелкодисперсных частицах. В отвалах углистый материал находится в раздробленном измельченном состоянии, поэтому угольные отвалы больше подвержены возгоранию, чем исходный уголь [37]. Уменьшение радиуса на 10 см снижает продолжительность инкубационного периода на 8 суток, увеличение радиуса скопления угля на 10 см приводит к увеличению инкубационного периода на 2 суток [38].

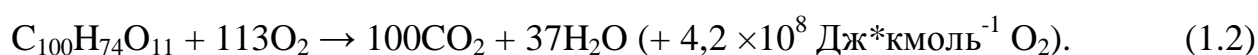
Окисление угля начинается с экзотермических химических реакций [39]. Окисление угля можно описать как процесс из трех последовательных стадий:

физическая адсорбция; химическая адсорбция или хемосорбция, в результате чего образуются угольно-кислородные комплексы; химическая реакция.

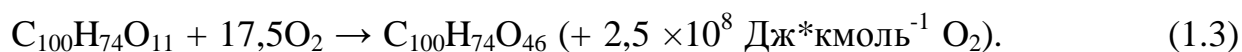
Химическая реакция разрушает менее стабильные угольно-кислородные комплексы для образования газообразных продуктов, таких как оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO₂) и вода (H₂O) [40]:



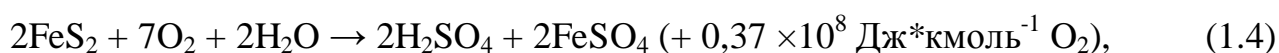
Вышеупомянутая реакция протекает в несколько этапов, которые зависят от наличия таких веществ, как вода и пирит. Полное окисление угля можно описать уравнением [39]:



Начальной стадией этой реакции является химическая адсорбция или хемосорбция O₂ на угольной поверхности [39]:



В присутствии каталитического вещества (пирит) проходят теплогенерирующие реакции [41]:



Важным фактором, приводящим к самовозгоранию углепородной массы, является химическое и биохимическое окислительное выщелачивание пирита при участии влаги и растворенного в ней кислорода. Совокупность действия вышеуказанных факторов усиливают процессы самонагревания и самовозгорания породных отвалов [42].

Роль микроорганизмов в процессах самонагрева горных пород заключается в расчленении поверхности пирита и увеличении его реакционной способной поверхности, окислении двухвалентного железа и серы в условиях, в которых невозможно их химическое окисление, в предотвращении отложения на поверхности минерала веществ новообразований, в непосредственном участии в экзотермических реакциях. Повышение температуры среды и увеличение реакционноспособной поверхности пирита за счет биохимических процессов интенсифицируют химические процессы окислительного выщелачивания пирита с дальнейшим повышением температуры и выделением веществ новообразования: серы, серной кислоты и соединений железа.

В работе [43] определены основные стадии процесса перехода самонагрева горных пород в их возгорание:

1. Самонагревание влажной горной породы вследствие биохимического и химического окислительного выщелачивания пирита, завершающееся образованием в нарушенном массиве или скоплении ее химического реактора
2. Прогревание химическим реактором поверхностного слоя горной породы и обогащение его элементной серой;
3. Самовоспламенение паров серы на воздухе возле нагретой до температуры 248...261°C поверхности горной породы и возгорание здесь метано-воздушной смеси;
4. Термическая деструкция углефицированного вещества и минеральных компонентов горной породы, сопровождающаяся выделением горючих веществ;
5. Возникновение устойчивого горения продуктов термической деструкции и газификации горной пород.

В литературе содержатся данные о том, что минералогический состав горевших ПО (наличие кремнезема, муллита, гематита) может указывать, что температура горения может достигать 1300°C [35].

В настоящее время разработан новый подход к объяснению механизма самовозгорания породных отвалов - концепция углеводородной флюидизации угленосных отложений. В соответствии с этой концепцией, в участках

тектонической нарушенности угольных пластов в результате проникновения глубинных гидротермальных растворов развиваются процессы флюидогенной трансформации угольного вещества и вмещающих пород, приводящие к образованию флюидоактивных зон с углями, обладающими аномальными структурно-энергетическими и технологическими свойствами, в таких зонах существенно изменяются структура и свойства угля, состав, объем и формы локализации газов, микроминералов и элементов-примесей [44].

По мере приближения к поверхности отвала температура самонагревающихся ПО снижается из-за теплоотдачи в окружающую среду. Экспериментально установлено, что наиболее благоприятные условия для образования очагов горения создаются на плоских породных 1-3 м от кромки откоса на глубине 1,8-2,5 м. Сюда поступает достаточное количество кислорода для протекания процесса при минимальной теплоотдаче в окружающую среду [2].

Для принятия оптимального комплекса мероприятий по предупреждению и ликвидации пожаров необходим своевременный мониторинг стадий развития процесса окисления отвальных пород. С развитием пожара стоимость его тушения значительно увеличивается, поэтому важным является своевременно выявить, локализовать и ликвидировать пожар.

Характеристика основных параметров самовозгорания органического вещества, создания моделей самовозгорания широко рассмотрена в исследованиях таких ученых как Пашковский П.С., Греков С.П., Игишев В.Г., Саранчук В.И. и др.

На основании математической модели процесса адсорбции кислорода и экспериментальных данных НИИГД «Респиратор» обобщены данные по определению удельных реакционных поверхностей образцов углей различной степени углефикации и по изучению их пористости, получена зависимость удельной реакционной поверхности от концентрации горючих веществ [45].

Прослежено изменение параметров окисления углей во времени по мере развития процесса их нагревания и теплоотвода от скопления. Получены

зависимости позволяющие использовать средние значения параметров окисления для расчета инкубационного периода самовозгорания углей [46].

В работе [47] была создана математическая модель процессов низкотемпературного окисления веществ органического происхождения на основе предлагаемой математической модели их нагревания и экспериментальных данных о теплофизических свойствах, размеров скоплений и условий теплообмена.

Авторами работы [48] выполнены расчеты температур скопления угля в шахтах I – III групп эндогенной пожароопасности и инкубационного периода по 42 шахтам, где произошли пожары на пластах с объемной долей летучих веществ от 8 до 42 %. Инкубационный период самовозгорания углей в зависимости от категории пожароопасности равен от 9 до 36 сут.

Выявлено, что температура таких органических веществ, как сено, травяная мука, сосновые опилки, семена подсолнечника, в диапазоне 0...70 °C поднимается в течение 3...35 суток за счет биологических процессов, а затем химических и продолжается до самовоспламенения в течение 2...18 суток. Температура семян зерновых в течение 2...3 недель в зависимости от влажности поднимается до 60...65 °C, после чего физико-химические свойства зерен изменяются, они чернеют и дальнейшее самонагревание прекращается [49].

В работе [50] предложен метод определения температуры очага самонагревания угля и времени его образования по анализу пожарных газов на окись углерода и убыль кислорода на окисления путем разработки математической модели процесса и использования экспериментальных данных.

Авторами исследовано выделение индикаторных пожарных газов при нагревании углей. Установлено, что содержание оксида углерода в продуктах окисления в стадии тления более чем в 100 раз превышает таковое на стадии самонагревания [51].

В работе [45] предложен алгоритм расчёта параметров теплоотдачи в слое твёрдого дисперсного вещества на основе математической модели низкотемпературного гетерогенного окисления.

Авторами работы [52] предложен метод определения коэффициентов теплоотдачи α в дисперсной среде при отсутствии конвективного переноса теплоты. Передача теплоты внутри дисперсной среды осуществляется теплопроводностью с коэффициентом теплоотдачи, характерным для данного вещества. Определены численные значения указанного параметра для случая очагового самонагрева травяной муки в насыпи с плотностью от 230 до 307 кг/м³.

В работе [53] проведено моделирование температурного поля и определены коэффициенты теплоотдачи породы в зависимости от распределения температуры внутри породы. Расчёты показали, что при нагревании шахтной породы постоянным источником теплоты коэффициент теплоотдачи и критерий Био внутри образца породы увеличиваются.

В работе [54] на основании полученных ранее зависимостей изменения во времени интенсивности поглощения углями кислорода с учетом выделения метана и исследований испарения влаги, установлено, что учет влияния выделения метана и влаги из углей приводит к некоторому увеличению комплексного показателя склонности угля к самовозгоранию.

Авторами установлено, что у склонных к самовозгоранию пластов угля молярная концентрация сорбируемого кислорода за 10 сут. – порядка 15...100 моль/м³, а у не склонных 0,6...15 моль/м³ [55].

В работе разработаны зависимости, позволяющие рассчитывать долю кислорода и реакционной поверхности, вступивших в реакции окисления и приводящих к нагреванию угля [56].

Авторами разработан новый комплексный показатель эндогенной пожароопасности органического материала, который позволяет по данным анализа проб угля в лабораторных условиях находить все необходимые его характеристики: критический размер пожароопасного скопления, пороговое значение критерия оценки склонности к самовозгоранию, инкубационный период, группу пожароопасности [57].

В основе самовозгорания лежит окисление угля и других горючих материалов с превращением химической энергии в тепловую при пассивной теплоотдаче в окружающую среду. Саранчук В.И. самовозгорание отвальной массы рассматривает как совокупность процессов термохимической реакции горючих веществ с кислородом воздуха, тепловыделения и переноса тепла, а также газодинамики в пористой среде. Автором разработана математическая модель процесса самовозгорания плоского породного отвала, учитывающая тепловой баланс, массоперенос и газодинамику в скоплении [2].

Несмотря на изученность процесса самовозгорания породного массива, комплекс поставленных задач не завершен. Приведенные исследования не учитывают коэффициент теплоотдачи к атмосфере, который позволит описать процесс теплоотдачи от очага самовозгорания к тепловизору при дистанционных методах теплового контроля породных отвалов.

1.3 Оценка существующих методов контроля теплового состояния

Для выбора оптимального комплекса мероприятий по предупреждению и ликвидации пожаров, снижения выбросов в атмосферу необходим своевременный мониторинг стадий развития процесса окисления отвальных пород. Своевременный мониторинг позволит выполнять мероприятия по предотвращению самовозгорания очагов на ПО и снизит выбросы в атмосферный воздух, что улучшит экологическую обстановку в ГПА.

Мониторинг теплового состояния ПО может проводиться как контактным путем – с помощью термопар, забитых в отвальную массу, так и дистанционно – с помощью тепловизионной техники и беспилотных летательных аппаратов, с помощью спутниковых данных (рис. 1.4).

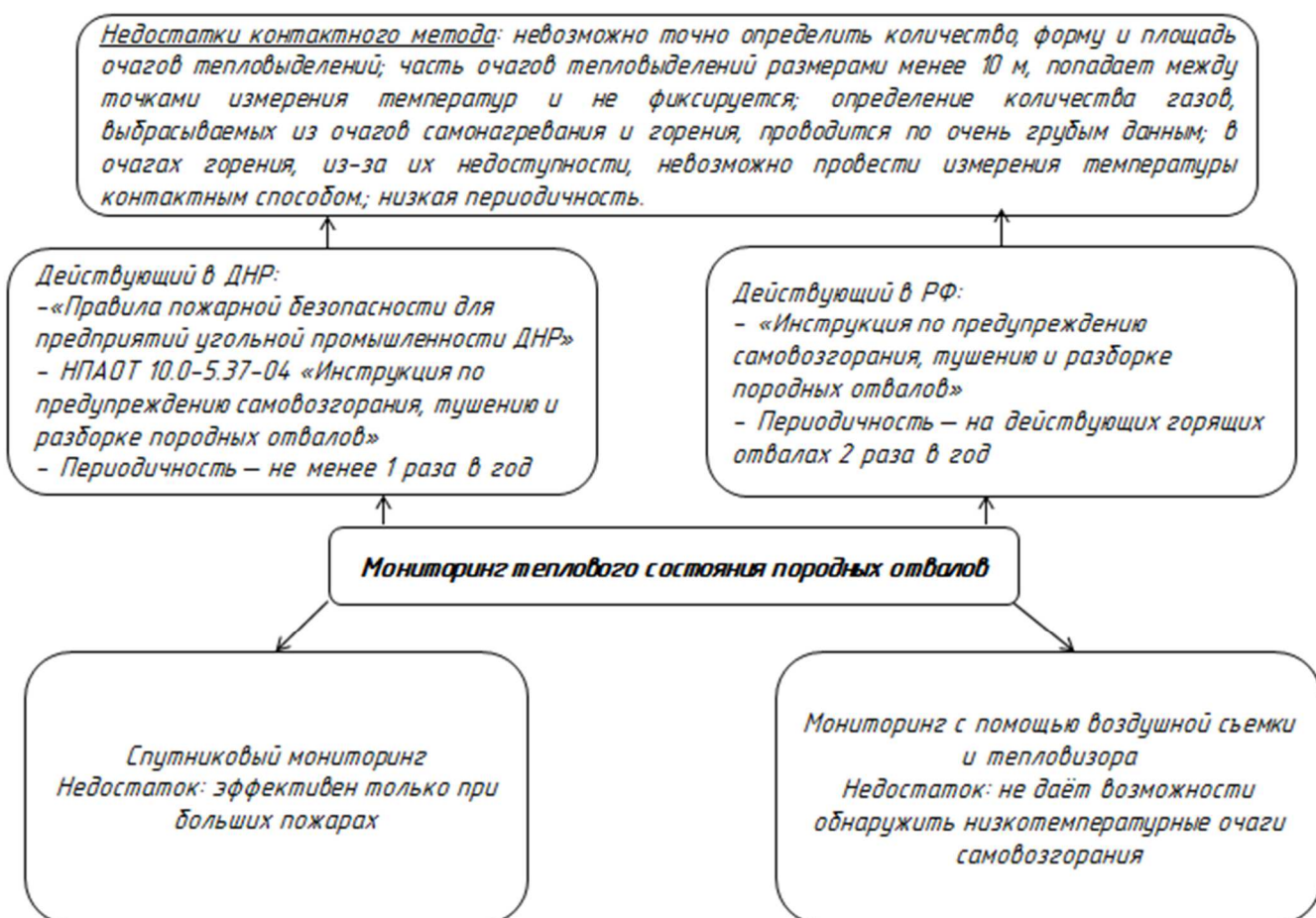


Рис. 1.4. Виды мониторинга теплового состояния породных отвалов

В настоящее время мониторинг теплового состояния ПО в ДНР проводится в соответствии с правилами пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР, где определение теплового состояния действующих породных отвалов и количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, проводится не реже одного раза в год.

Температурная съемка, в соответствии с действующей в Республике «Инструкцией по предупреждению самовозгорания, тушению и разборке породных отвалов», проводится с помощью контактных термометров и забитых в отвальную массу на глубины от 0,5 до 2,5 м термопар [58]. Результаты температурной съемки используют для определения площади очагов самовозгорания и расчета выбросов загрязняющих веществ.

В Российской Федерации контроль теплового состояния ПО проводится в соответствии с «Инструкцией по предупреждению самовозгорания, тушению и

разборке породных отвалов», утвержденной приказом Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору N 738 от 23.12.2011 г [59].

Температурная съемка по инструкции проводится контактным методом – с помощью термопар погруженных в отвальную массу.

Существующая методика проведения контактной температурной съемки породных отвалов имеет ряд существенных недостатков - часть очагов тепловыделений размерами менее 10 м, без явных признаков горения, попадает между точками измерения температур и не фиксируется; в очагах горения, из-за их недоступности, невозможно провести измерения температуры контактным способом; по регламентированным схемам расположения точек замеров (по горизонтали - через 20 м, по вертикали - слои с высотой 10 м, на конических поверхностях - секторами через 45^0) на породных отвалах различной формы невозможно точно определить количество, форму и площадь очагов тепловыделений [60].

В мировой практике дистанционный тепловой контроль получил широкое практическое применение в космической отрасли, где разнообразие задач неразрушающего контроля не позволяет ограничиться одним или несколькими методами.

Стоимость работ на различные виды тепловизионных обследований была в разработана Минэнерго СССР. В настоящее время стоимость работ составляет от 300 до 3000 долларов США на объекты типа участка теплотрассы, жилого дома, электрической подстанции, дымовой трубы, и т.п. Тепловизионная диагностика была признана Минэнерго РФ и РАО «ЕЭС России» в качестве штатного средства испытаний электроустановок. Тепловидение также применяется при обследованиях котлов и печей, дымовых труб, изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов и т.п. Тепловидение используется в качестве важного инструмента диагностики качества строительства и энергосбережения [61].

Работы по использованию тепловизионной техники для температурной съемки ПО начались в СССР и за рубежом в 60..80 – годах прошлого столетия. Их

широкое применение сдерживалось дороговизной инфракрасной (ИК) техники (30...800 тыс. \$), преимущественным использованием ее в военном деле, что связано с закрытостью такого рода тематики и дефицитом комплектующих изделий.

В этот период НИИГД «Респиратор» был разработан и серийно изготовлялся ИК-прибор «Квант-РТ» для бесконтактного определения температуры нагретых тел в подземных условиях и на поверхности. Его основным недостатком была низкая разрешающая способность по линейным размерам тепловых «пятен». Это обусловлено конструкцией, в которой использован всего один чувствительный элемент, дающий интегральное значение температуры по всей визируемой поверхности. Это ограничивало расстояние съемки дистанцией в несколько метров. Для съемки больших площадей этот вид ИК-техники был неприемлем.

Для съемки пространств, соизмеримых с боковой поверхностью породных отвалов (высота – 20...140 м, ширина 70...600 м) использовались тепловизоры – устройства аналогичные приборам ночного видения, в которых на экране электронно-лучевой трубки отображалась тепловая картина поверхности объекта. После выявления координат тепловых «пятен», дальнейшую съемку производили контактными приборами. В Донбассе для этих целей применяли импортные тепловизоры шведского и британского производства, как правило, это были отработавшие свой ресурс приборы весьма ненадежные и дорогие (10...15 тыс. \$). После введения таможенных пошлин такая техника стала непомерно дорогой для организаций и частных предпринимателей в Украине.

Прорывом в рассматриваемом вопросе стала разработка харьковскими специалистами отечественного матричного (420x420 элементов) теплочувствительного элемента, охлаждаемого жидким азотом, и соединенного с компьютером. На тот период это было пионерское решение, один из первых компьютерных термографов. Бесконтактным способом определялась температура любой самой опасной и недоступной поверхности. С помощью ПЭВМ появилась возможность определить с высокой точностью: температуру в точке, тепловой

профиль по любой трассе, тепловые потоки с любой площади, построить изотермы и т.п. Стоимость такой техники составляла до 7...10 тыс. \$, включая стоимость «ноутбука».

Появление современных тепловизоров и массовый характер их производства позволили существенно снизить стоимость тепловизионной техники. В настоящее время благодаря качеству и надежности распространение получили тепловизоры Fluke, Testo, Flir.

Использование тепловизоров возможно как в ручном режиме, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Массовое производство БПЛА, наиболее приближенных к требуемым техническим условиям использования, а также стабильных в управлении и в работе, делает их использование актуальным.

Беспилотные летательные аппараты позволяют обеспечить своевременное обнаружение очагов тепловыделения на начальной стадии горения, проанализировать состояние воздуха, наличие в нем вредных веществ и их концентрацию (табл. 1.2). Крупные БПЛА предназначены для непосредственного тушения пожаров. Многие производители тепловизоров предлагают готовые комплекты для дистанционной съемки – тепловизор и БПЛА [62].

Впервые методы дистанционного зондирования для обнаружения и определения местоположения очагов самовозгорания на породных отвалах были применены в США в 1963 году в Скрантоне (штат Пенсильвания). В 60-е и 70-е годы многие американские ученые проводили наблюдения за горящими породными отвалами, используя тепловизионные камеры, размещенные на борту летательных аппаратов. Однако технические возможности тепловизионной техники в тот период давали очень грубую оценку температуры очагов самовозгорания [63, 64].

Табл.1.2. Характеристика и стоимость некоторых БПЛА и тепловизоров (на декабрь 2017 год)

Название	Время полета мин	Максимальная высота полета	Максимальная дальность полета	Цена, руб.
БПЛА DJI Inspire 2	27	2500 м	4 км	240 000
БПЛА DS700 THOR	40	2500 м	5 км	220 000
БПЛА + тепловизор Flir Aerial	18	4500 м	5 км	600 000
БПЛА DJI Phantom 4 PRO	30	2500 м	5 км	110 890
БПЛА DJI Phantom 2 vision+ с тепловизором FLIR TAU 2	30	5000 м	5 км	499 990
БПЛА DJI Phantom 3 Standard	25	6000 м	5 км	44 290
Тепловизор CGO-ET 160*120	-	-	-	160 000

Методы дистанционного зондирования горящих породных отвалов, основанные на спектральном сканировании в тепловом инфракрасном диапазоне, использовались с 1983 года в угледобывающих районах Китая и Индии, где были получены карты спонтанного нагрева породных отвалов [64, 65, 66].

Для выявления очагов самовозгорания проводились спутниковые исследования, которые показали что, несмотря на значительный прогресс, дистанционное зондирование и измерение температуры могут быть эффективными только при больших пожарах из-за низкого пространственного разрешения теплового сканирования поверхности [67, 68]. Для нахождения очагов пожаров также используются геофизические методы [69, 70] и методы ГИС [71, 72].

Анализ состояния породных отвалов с использованием летательных аппаратов и тепловизора был также осуществлен на породных отвалах Польши. Во время воздушной съемки регистрировались термограммы вдоль траектории полета, при этом получалась серия изображений, которые позволили построить термографическую карту района [66].

В приказе Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 декабря 2011 г. N 738 г. Москва «Об утверждении Инструкции по предупреждению самовозгорания, тушению и разборке породных

отвалов» тепловизор находится в числе рекомендуемого оборудования. Согласно вышеприведенной инструкции тепловизор – средство измерения температуры по тепловому излучению объекта и преобразования её в визуальную картину распределения тепловых полей по поверхности объекта в реальном времени.

Использование тепловизора дает возможность обнаружить потенциальные очаги тепловыделения на ранних этапах, что может быть полезным при определении приоритетности работ по предотвращению самонагрева [73].

Существующие современные методы дистанционного контроля теплового состояния ПО не позволяют выявлять низкотемпературные очаги самовозгорания породных отвалов, так как не учитывают условий съемки и влияние внешних факторов на результаты тепловизионной съемки. К основным внешним факторам относятся расстояние от очага самовозгорания до тепловизора, размеры очага самовозгорания, ракурс дистанционной съемки, теплопроводные свойства породы и т.д. [74].

1.4 Анализ газового состава выбросов горящих ПО

В глобальном масштабе выбросы большого количества парниковых газов из ГПО могут вносить вклад в изменение климата и экосистем. В региональном и локальном масштабе выбросы оксидов углерода, оксидов азота, сернистого ангидрида, сероводорода, взвешенных частиц и микроэлементов могут вызывать ухудшение здоровья населения. Такие летучие элементы как мышьяк, фтор, ртуть, селен часто встречаются в залежах угля, а при возгорании они могут улетучиваться в атмосферу, а затем вдыхаться, или адсорбироваться на растениях и передаваться затем по пищевым цепям [8]. Анализ выделяемых газов подробно отражен в работах М. Attalla, М. Masalehdani, С. Kuenzer и др. [75, 76, 77, 78].

При сжигании некоторые элементы (Cl, F, S, N, As, Cd, Hg, Pb, Sn, Ge, S) могут выбрасываться в атмосферу, что представляет опасность для населения городских агломераций [79].

Самовозгорание и низкотемпературное окисление ПО потенциально представляет собой большой источник парниковых газов. Исследование, проведенное на примере отвалов Австралии, показало увеличение выбросов CO_2 и CH_4 при увеличении температуры поверхности отвалов [80].

В процессах низкотемпературного окисления продуцируется, главным образом, CO_2 . При повышенных температурах при самовозгорании, отмечается недостаток кислорода, изменяются химические реакции и образуются значительные количества CH_4 [80].

Температура нагрева, динамически изменяющаяся в пространстве и во времени по отвалу, служит фактором химических изменений в органическом веществе углей, таким как образование фенолов и их производных, изменениях в распределении н-алканов, гопанов, полициклических ароматических углеводородов, присутствующих в пиролизатах. Некоторые из этих соединений образуются как результат термической деструкции липнитита и витринита (органической составляющей угля) при разных температурах и мигрируют в пределах отвала. Более легкие компоненты выбрасывались в атмосферу, а другие, особенно, фенолы и ПАУ, могут выщелачиваться в более глубокие слои отвалов или, возможно, даже в грунтовые воды [81].

Многими исследователями проводились измерения отходящих газов на ГПО. Исследования газовых выбросов ГПО в Авиньоне, Северная Франция показали следующие концентрации загрязняющих веществ (табл. 1.3) [82].

Табл. 1.3. Состав газовой фазы на очагах тепловыделения

Очаг	T °C*	SO ₂ , ppm	CO, ppm	CO ₂ , wt%	CH ₄ , ppm	NO _x , ppm	H ₂ O, mL
S1	100	<5	-	-	80	15-26	100
S2	225	11	-	-	47	15-26	-
S3	100	9.6	110	7	-	26	3550
S4	56	19.8	22	6.13	191	7.87	30

* температура газа

Российскими исследователями проводился отбор газовых конденсатов на ГПО Челябинской области, на ПО Кемеровской области и на отвалах металлургического производства Беловского цинкового завода. Объектами исследования являлись парогазовые конденсаты, отобранные непосредственным забором и охлаждением газов из фумарол [83].

Химический состав газовых конденсатов угольных отвалов различен. При длительном горении внутри отвала начинают происходить процессы метаморфизма отвальных пород, с образованием новых минеральных фаз и выбросом специфического спектра элементов.

По данным этих же исследователей из отвалов Комсомольского золотоизвлекательного завода постоянно происходит выделение ряда химических веществ. Максимальные концентрации в газоаэрозольной смеси имеют основные породообразующие макрокомпоненты: Mg, K, Ca, B, Na, Fe, Si. Из микрокомпонентов преобладают Mn, Zn, Ba, As, Ni, Sr [84].

С газоаэрозольными потоками слабо выбрасываются основные породообразующие элементы: Al, Fe, Si, Ti, поскольку они находятся в плохорастворимой форме. Наиболее подвижные компоненты системы - Ni, Cr, Mo и ряд щелочных металлов (Mg, Zn, Na).

При температурах выше 100°C ртуть переносится в элементной форме, при низких температурах - в виде хлорида (HgCl). При температурах выше 400°C же в элементной форме могут переноситься Cd и Zn. В интервале температур $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$ преобладают формы ZnCl_2 , ZnBr_2 , CdCl . Железо и алюминий переносятся в виде своих гидроксидов: $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Однако NaAlF_4 , KAlF_4 , AlClF_2 преобладают при температурах до 400°C . В виде фторидов так же переносится и сурьма ($t < 300^{\circ}\text{C}$), при более высоких температурах основными формами становятся оксиды и сульфиды: Sb_4O_6 , SbS . Остальные металлы (Ca, Na, Mg, K, Sr, Ti, Ga, Mn, Pb, Cu, Cr, Ag) при температуре до 600°C находятся в форме хлоридов - Me_xCl_y .

В исследованиях Саранчука В.И. установлено наличие следующих газов в газовой смеси горящих породных отвалов – водород, метан, оксид углерода, диоксид углерода, сероокись углерода, сероуглерод, сероводород, сернистый ангидрид, оксид азота, кислород, азот [2].

Водород появлялся при температуре 600-800⁰С в количестве 3,32 г/кг отвальной массы. Метан появлялся при температуре 400⁰С в количестве 13,39 г/кг отвальной массы. Оксид углерода начинал выделяться при температуре 100-300⁰С в количестве до 13,39 г/кг отвальной массы. Пары сероуглерода были обнаружены в продуктах горения при температуре 500-600⁰С. Сернистый ангидрид появлялся при температуре 400⁰С в количестве 1,1 г/кг породы. Сероводород появлялся в продуктах горения после 400⁰С в количестве до 19,29 г/кг отвальной породы. Оксиды азота появлялись при 400-500⁰С в небольших количествах.

Основными факторами, определяющими состав и количество газов, выделяющихся при окислении и горении отвальной массы, являются приток воздуха, температура протекания процесса, вещественный и фракционный состав отвальной массы и степень метаморфизма.

Исследователями проведены лабораторные исследования выбросов оксида углерода, диоксида серы, диоксида углерода, сероводорода, оксидов азота при термической деструкции ПО шахт. Установлены зависимости концентрации газов от температуры породного массива отвалов [85, 86].

С начала двадцатого века предложен ряд показателей и коэффициентов, которые используются во всем мире для обнаружения и оценки самовозгорания углей. Одними из них являются характеризующие содержание концентраций СО и СО₂ в загрязненном воздухе (табл.1.4) [87, 88].

Породы отвалов шахт Донбасса содержат значительное количество угля. По данным Южгипрошахт в отвальной массе угля размером от 25 мм содержится от 1,7 до 12,4%. Учитывая большое содержание угля в породных отвалах, использование газовых показателей самовозгорания угля при оценке теплового состояния породных отвалов считается целесообразным.

Величины выбросов в атмосферный воздух при горении породных отвалов используются при составлении статистической отчетности предприятий, а также при расчете платы за выбросы в атмосферу каждого загрязняющего вещества.

Табл.1.4. Показатели самовозгорания углей

Показатель	Значение	Характеристика
CO ₂ / CO	< 0,5 %	Отсутствие самовозгорания
	0,5-1,5 %	Эффект тления
	1,5-10%	Активное горение
	> 10 %	Открытый огонь
CO/CO ₂	<2	Отсутствие самовозгорания
	2-13	Поверхностный нагрев
	>13	Активное горение

В Российской Федерации расчет выбросов в атмосферу от горящих породных отвалов проводится в соответствии с «Сборником методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами» [89].

В соответствии с методикой производится расчет следующих загрязняющих веществ - окись углерода, двуокись углерода, сернистый газ, сероводород и окислы азота. Расчет производится по удельным значениям выбросов, расчет не зависит от температуры горящего породного отвала.

В Украине расчет выбросов в атмосферу проводится в соответствии СОУ-П 10.1-00174102.007:2008 «Выбросы вредных веществ из породных отвалов. Методика расчета», разработанная НИИГД «Респиратор» [90]. Методика учитывает температуру очагов самонагрева при расчете выбросов загрязняющих газов в атмосферный воздух.

В методике представлены, полученные теоретическим путем расчётные зависимости скорости выделяемых вредных веществ (мг/м²·с) от температуры:

$$q_{CO} = 15,31 + 0,2148\Delta T_{max}, \quad (1.6)$$

$$q_{SO_2} = 2,847 + 0,546\Delta T_{max}, \quad (1.7)$$

$$q_{H_2S} = 14,52 \exp + [-6,7 \cdot 10^{-5} (\Delta T_{max} - 256)^2], \quad (1.8)$$

$$q_{NO_x} = 0,575 + 3,839 \cdot 10^{-4} \Delta T_{max}, \quad (1.9)$$

Здесь ΔT_{\max} – максимально возможная температура в очаге самонагрева на глубине 0,1 м.

Ранее, в 1997 году, исследователями разработана математическая модель газовыделений на породных отвалах отличающаяся тем, что газовыделения описываются с учетом разности концентрации на глубине 0,1 м и на поверхности отвала, диффузных параметров среды и фактической площади горения. Также установлено, что концентрации газов ($C_{0,1}$, г/м³) и удельные газовыделения ($I_{0,1}$, г/с м²) хорошо коррелируются с температурой пород поверхности отвала и описываются зависимостями: для оксида углерода – $C_{0,1}=at^b$; для диоксида углерода и сероводорода $C_{0,1}=a+bt+ct^2$; для диоксида серы $C_{0,1}=a+bt$ (t – температура пород поверхности отвала на глубине 0,1 м, °С; a , b , c – эмпирические коэффициенты) [91]. Концентрации сероводорода в диапазоне температур 100-260°С равны $C_{0,1}=\exp(a+bt)$. Зависимость удельных выделений СО от температуры с учетом свойств угля Подмосковного, Печорского и Челябинского угольных бассейнов представлена на рис. 1.5.

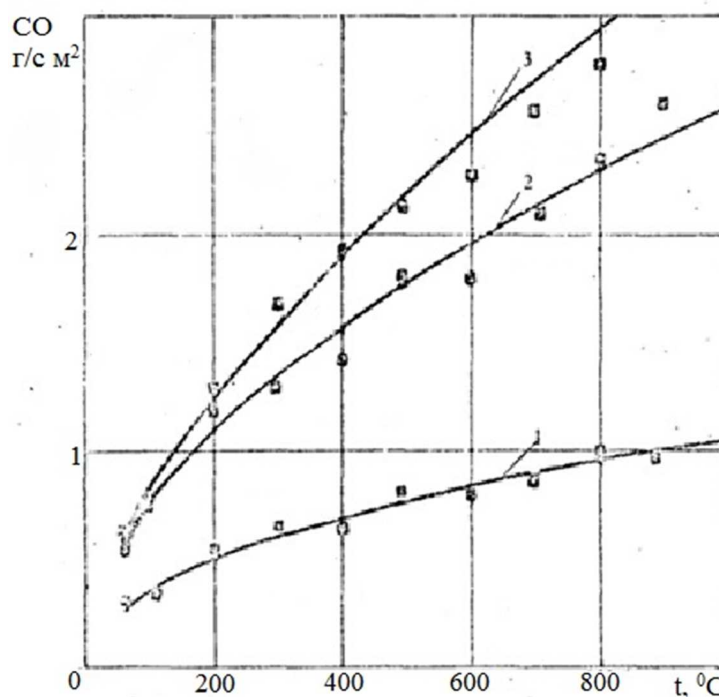


Рис. 1.5. Зависимость удельных выбросов СО (г/с м²) от температуры (t , °С)
(1- Подмосковный бассейн, 2 – Печорский бассейн, 3 – Челябинский бассейн)

Метод определения газовыделений из породного отвала с использованием замерной рамки не получил практического применения из-за несовершенства конструкции.

Таким образом, в настоящее время оценка выбросов в атмосферный воздух при горении породных отвалов проводится по основным загрязняющим веществам по расчетным методикам.

Исследования выбросов макрокомпонентов: Ca, Na, K, Mg, Fe, B, Si и микрокомпонентов *Zn*, *As*, Mn, Sr, Ba, Ni не содержат связи величины выбросов от температурного состояния отвала.

Для принятия оптимального комплекса мероприятий по предупреждению и ликвидации пожаров необходим своевременный мониторинг стадий развития процесса окисления отвальных пород. Важным является своевременно выявить, локализовать и ликвидировать очаги самовозгорания на породных отвалах. Контроль теплового состояния и газового режима ПО дает большие возможности по выявлению пожаров на ранних стадиях.

Визуальное наблюдение не позволяет выявлять ранние признаки самонагревания и своевременно принять меры по недопущению самовозгорания. Такие возможности дает применение тепловизионной техники и газоанализаторов. Применение современных технологий по соответствующим методикам позволяет не только выявить процессы горения, но и помогает локализовать очаги самонагревания и горения, сконцентрировав усилия на данных зонах при разработке мер по ликвидации пожаров

1.5 Выводы

1. ПО предприятий Донецкой Народной Республики (ДНР) находятся в черте ГПА и оказывают негативное влияние на окружающую среду. Проведенный расчет рассеивания выбросов загрязняющих веществ, показал, что, несмотря на не превышенную санитарно-защитную зону, горящий породный отвал шахты «Октябрьский рудник» оказывает негативное воздействие на жителей горнопромышленной агломерации - суммарное действия сероводорода и диоксида серы составляет 1,99 ПДК.

2. Действующее законодательство ДНР не позволяет обеспечить необходимую периодичность контроля теплового состояния ПО и соответственно своевременное выполнение мероприятий по предупреждению возникновения и тушению очагов самовозгорания. Это ведет к повышенному негативному воздействию на здоровье населения и может привести к неконтролируемым последствиям – взрывам углепородного массива.

3. Существующие контактные методы определения теплового состояния ПО имеют ряд существенных недостатков (часть очагов тепловыделений размерами менее 10 м, без явных признаков горения, попадает между точками измерения температур и не фиксируется; в очагах горения, из-за их недоступности, невозможно провести измерения температуры контактным способом; по регламентированным схемам расположения точек замеров (по горизонтали - через 20 м, по вертикали - слои с высотой 10 м, на конических поверхностях - секторами через 45°) на породных отвалах различной формы невозможно точно определить количество, форму и площадь очагов тепловыделений) и не позволяют своевременно предотвращать образование очагов самовозгорания, и достоверно оценивать их негативное воздействие. Существующие методы дистанционного контроля теплового состояния ПО не позволяют выявлять низкотемпературные очаги самовозгорания, так как не учитывают условий съемки и влияние внешних факторов на результаты тепловизионной съемки.

4. Несмотря на изученность процесса самовозгорания породного массива, приведенные исследования не учитывают коэффициент теплоотдачи от очага самовозгорания к тепловизору при дистанционных методах теплового контроля ПО.

5. Анализ исследований продуктов горения породных отвалов показал возможность оценки теплового состояния породных отвалов по газовому составу их выбросов.

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ

2.1 Теоретические основы учета влияния основных факторов воздействия на дистанционный контроль теплового состояния ПО

Применение дистанционных средств и способов температурного контроля породных отвалов шахт и обогатительных фабрик тесно связано с методом инфракрасной термографии. Тепловое или инфракрасное излучение возникает в твердых телах, жидкостях и газах вследствие колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения молекул.

Инфракрасное излучение занимает широкий диапазон электромагнитного спектра с длинами волн от 0,75 мкм до 1000 мкм, находясь между видимым светом и радиоволнами. Согласно рекомендации Международного светотехнического словаря выделяют коротковолновой участок ИК спектра (ближняя область) от 0,76 до 1,4 мкм, средневолновой участок (средняя область) от 1,4 до 3 мкм и длинноволновой участок (дальняя область), который простирается от 3 до 1000 мкм. В тепловидении терминами «коротковолновой» и «длинноволновой» обозначают диапазоны 3-5,5 мкм и 7-14 мкм.

Использование инфракрасной термографии в дистанционных способах температурного контроля ПО шахт и обогатительных фабрик позволит обеспечить достоверность, безопасность и экономию средств при мониторинге теплового состояния ПО.

При использовании дистанционных методов контроля теплового состояния ПО необходимо учитывать влияние основных факторов на фиксируемую дистанционными методами энергетическую светимость.

К основным факторам дистанционного контроля относятся расстояние от очага самовозгорания до тепловизора, размеры очага самовозгорания, ракурс дистанционной съемки, теплопроводные свойства породы и атмосферы.

На основные факторы дистанционного контроля влияют ослабление излучения атмосферой, турбулентность атмосферы, ракурс дистанционной

съемки и теплофизические характеристики породы и атмосферы при дистанционном контроле температуры [74].

К теплофизическим характеристикам при дистанционном контроле теплового состояния поверхности ПО относятся коэффициенты теплоотдачи к породе и в атмосферу, коэффициенты теплопроводности породы и атмосферы, тепловой поток от очага самовозгорания. Проведенный ранее анализ исследований показал отсутствие учета вышеприведенных теплофизических характеристик во всех методах дистанционного контроля теплового состояния ПО.

Наличие флуктуаций атмосферы между очагом самонагревания на поверхности породного отвала и тепловизором сильно затрудняют проведение измерений, внося систематическую ошибку, которая зависит от длины волны распространяющегося излучения, метеорологических условий, турбулентности атмосферы, ракурса и расстояния дистанционной съемки. Ослабление инфракрасного излучения атмосферой зависит от двух явлений - поглощения газов, составляющих атмосферу и ослабления из-за рассеяния на частицах, присутствующих в атмосфере, молекулах или аэрозолях [92, 93, 94, 95].

При ослаблении из-за поглощения газов, составляющих атмосферу, поглощающие газы излучают как селективные тела в зависимости от их температуры, а во втором случае отклонение излучения от первоначального пути делает его «заметным» для системы наблюдения. В результате на объект накладывается «светлая» дымка.

К заметно поглощающим оптическое излучение газовым компонентам атмосферы относятся пары воды (H_2O); углекислый газ (CO_2); озон (O_3), а к слабо поглощающим относятся закись азота (N_2O), оксид углерода (CO), кислород (O_2), метан (CH_4) и азот (N_2) [92].

Данные о концентрации и поглощении этих молекулярных составляющих атмосферы обобщены по результатам многочисленных работ, проведенных ранее и приводящихся до настоящего времени. Полученные результаты представляют основу для расчета прозрачности атмосферы.

В то время как концентрации N_2O , CO , O_3 , CH_4 , N_2 для большинства задач могут считаться практически постоянными, концентрация паров воды может изменяться в широких пределах, как в пространстве, так и во времени.

Результирующий коэффициент пропускания получается как произведение коэффициентов, взятых для каждого газа отдельно. Концентрация паров воды может быть измерена химическими, электрическими или спектроскопическими методами. Концентрация углекислого газа (порядка 0,0324 %) остается приблизительно постоянной.

При рассеянии энергии излучения на частицах, из которых состоит среда, происходит отклонение потока от первоначального направления, что может сопровождаться поглощением энергии веществом этих частиц [92, 97, 98].

При работе в инфракрасном диапазоне необходимо учитывать излучение составляющих атмосферу газов и частиц. Экспериментальные исследования пропускания атмосферы требуют много времени и затрат и не могут охватить всю совокупность различных условий. Общие методы расчета основаны на учете молекулярного поглощения и рассеяния на частицах.

С помощью закона Ламберта-Бэра описывается общее ослабление в оптически однородной среде для излучения с длиной волны λ [99, 100]:

$$I_{l\lambda} = I_{0\lambda} * e^{-\alpha_{\lambda}l}, \quad (2.1)$$

где $I_{0\lambda}$ - сила излучения в начале трассы;

$I_{l\lambda}$ - сила излучения, прошедшего путь l ;

α_{λ} - показатель ослабления.

Коэффициент пропускания среды ($\tau_{c\lambda}$) на трассе длиной l км с учетом поглощения и рассеяния излучения равен:

$$\tau_{c\lambda} = e^{-k(\lambda)l} * e^{-a(\lambda)l}, \quad (2.2)$$

где $k(\lambda)$ - коэффициент поглощения;

$a(\lambda)$ - коэффициент аэрозольного ослабления.

Для определения общего пропускания атмосферы необходимо найти значения коэффициентов $k(\lambda)$ и $a(\lambda)$ при рассматриваемых метеоусловиях. Основные поглощающие и рассеивающие компоненты атмосферы, а также давления и температуры в зависимости от высоты над уровнем моря для разных климатических поясов, образующие модель атмосферы приводятся в табличном виде [99, 100].

Важным фактором при дистанционном контроле теплового состояния породных отвалов является определение максимального расстояния выявления самовозгорания на породных отвалах. При использовании беспилотных летательных аппаратов для дистанционного контроля увеличение расстояния съемки ограничено их техническими возможностями и стоимостью работ [101, 102].

На энергетическую светимость, фиксируемую при дистанционном контроле теплового состояния породных отвалов, значительное воздействие оказывает турбулентность атмосферы. В результате турбулентных движений в атмосфере создаются оптические неоднородности, размеры которых колеблются от нескольких миллиметров до сотен метров. Влияние зоны турбулентности на фиксируемую энергетическую светимость увеличивается при увеличении расстояния между очагом тепловыделения и тепловизором [92, 99].

Очаги самовозгорания на поверхности ПО имеют различную форму. Влияние формы очагов самовозгорания на энергетическую светимость, фиксируемую при дистанционном контроле температуры поверхности породных отвалов, не изучено и требует дальнейших исследований.

Для оценки усредненного пропускания атмосферы могут использоваться модели пропускания атмосферы. Так, военно-морским флотом США используется эмпирическая модель, основанная на более чем 700 измерениях пропускания атмосферы в трех регионах Мирового океана [98].

2.2 Анализ влияния ослабления излучения атмосферой при дистанционном контроле температуры

2.2.1 Поглощение инфракрасного излучения атмосферой

К основным поглощающим компонентам атмосферы относятся углекислый газ, водяной пар и озон, который оказывает влияние на высоте 22..27 км.

Отдельные полосы поглощения излучения компонентами атмосферы образуют картину спектрального пропускания атмосферы, вид которой зависит от концентрации поглощающих веществ, изменяющихся с высотой трассы, по длине трассы, и других факторов [92].

Для приближенных расчетов концентрации поглощающих компонентов используют такие упрощенные методы как метод, основанный на определении толщины осажденного слоя воды [99].

Коэффициент поглощения инфракрасного излучения атмосферой (τ_n) зависит от газообразных компонент, содержащихся в атмосфере. Для практических целей следует учитывать те две из них, которые наиболее сильно по сравнению с другими влияют на пропускание на горизонтальной трассе, а именно поглощение парами воды и поглощение углекислым газом [92]:

$$\tau_n = \tau_{H_2O} * \tau_{CO_2}. \quad (2.3)$$

Поглощение парами воды, содержащимися в атмосфере, обусловлено следующими факторами [92, 98, 99, 102]:

1) числом поглощающих молекул, которые зависят, с одной стороны, от парциального давления паров воды и, с другой стороны, от расстояния D , проходимого излучением в поглощающей среде. Этот фактор часто характеризуют толщиной слоя воды, осажденной в трассе, длиной D ;

2) природой молекулярных переносов, ответственных за селективные спектры поглощения;

3) температурой и полным давлением смеси газов, которые определяют ширину спектральных линий - лоренцовской за счет соударений и доплеровской за счет эффекта Доплера.

Известно, что толщина слоя осажденной воды h , зависит от относительной влажности воздуха (HR). Расчеты по эмпирическим формулам коэффициента пропускания τ_{H_2O} для выбранного спектрального диапазона в функции толщины слоя осажденной воды h для данной трассы проводились многими исследователями.

В таблицах Пассмана – Лармора приведены значения для горизонтальных трасс на уровне моря [92]. На высоте наблюдается сужение спектральных полос из-за уменьшения давления, что приводит к улучшению пропускания, пропускание улучшается и за счет уменьшения содержания водяных паров в атмосфере с ростом высоты.

Концентрация углекислого газа в атмосфере зависит только от давления: на нулевой высоте можно считать концентрацию постоянной. Следовательно, коэффициент пропускания углекислого газа F_{CO_2} зависит только от проходимого излучением расстояния. В расчете используются таблицы Пассмана – Лармора для горизонтальной трассы на уровне моря.

Для расчета коэффициента пропускания $\tau_n(\lambda)$, используется метод учета отдельных составляющих поглощения с дальнейшим их объединением в метод, использующий модели земной атмосферы, среди которых наиболее известные модели, разработанные в США - LOWTRAN, MODTRAN, HITRAN, FASCODE [99, 102, 104], и модель, разработанная в Государственном институте прикладной оптики.

2.2.2 Аэрозольное ослабление инфракрасного излучения

Аэрозольное ослабление на частицах учитывает рассеяние и поглощение излучения веществом. Коэффициент рассеяния σ_p характеризует отношение рассеянного частицей излучения к излучению, падающему на частицу.

Коэффициент поглощения σ_n характеризует отношение энергии, поглощенной частицей к падающей на нее энергии [92, 95, 102].

Спектральный коэффициент ослабления при молекулярном рассеянии определяется как:

$$\sigma_{\text{рэл}}(\lambda) = 0,83 * N_m * A^3 \lambda^{-4}, \quad (2.4)$$

где N_m – число молекул в 1 см^3 ; A — площадь поперечного сечения молекулы, см; λ – длина волны излучения, см.

Коэффициенты молекулярного рассеяния для дистанции 10 км приведены в табличном виде (табл. 2.1). С ростом длины волны излучения для дымки и тумана рассеяние уменьшается.

Табл. 2.1. Коэффициенты молекулярного рассеяния для $l = 10 \text{ км}$

λ , мкм	$\sigma_{\text{рэл}}(\lambda)$, см^{-1}	τ , %
0,35	$79,3 * 10^{-8}$	45
0,55	$12,3 * 10^{-8}$	89
0,76	$3,30 * 10^{-8}$	97
1,00	$1,09 * 10^{-8}$	99
1,20	$5,25 * 10^{-9}$	-
3,00	$1,33 * 10^{-10}$	-
5,00	$1,73 * 10^{-11}$	-

Эмпирическая формула, предлагаемая моделью LOWTRAN, учитывает рассеяние излучения на дождевых каплях [92]:

$$\sigma_{\text{ад}} = 0,36 v_n^{0,63}, \quad (2.5)$$

где v_n - скорость выпадения осадков, $\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ (табл. 2.2).

Общий коэффициент ослабления при дожде не зависит от длины волны излучения и определяется только рассеянием на каплях: $\tau_c = e^{-\sigma_{\text{ад}} l}$.

Кроме дымки, дождя, тумана, и снега на работу ИКС могут заметно влиять и другие аэрозоли, в том числе взвешенные вещества [105].

Табл. 2.2. Скорость выпадения осадков для разных погодных условий

Погодные условия	Скорость выпадения осадков, мм-ч ⁻¹
Легкий туман, дымка	0,025
Изморось	0,25
Слабый дождь	1,0
Умеренный дождь	4,0
Сильный дождь	16
Сплошной сильный дождь	40
Ливень	100

В практической деятельности используется такой критерий как метеорологическая дальность видимости D_v , которая равна расстоянию, на котором контраст между очагом самонагревания и окружающим его фоном снижается до порога контрастной чувствительности глаза. Она характеризует метеорологическое состояние среды (ее мутность) [92, 99]:

$$D_v = \ln(1/\varepsilon_k)/\gamma_\lambda, \quad (2.6)$$

где γ_λ - показатель рассеяния;

ε_k - порог контрастной чувствительности приемника.

Международный код видимости и соответствующие D_v значения γ_λ приведены в таблице 2.3.

Табл. 2.3. Международный код видимости, метеорологическая дальность видимости D_M и показатель рассеяния $\gamma_{\lambda 0}$

Кодовый номер	Погодные условия	D_v , м	$\gamma_{\lambda 0}$, км ⁻¹
0	Плотный туман	<50	>78,2
1	Густой туман	50...200	78,2...19,6
2	Обычный туман	200.. .500	19,6...7,82
3	Легкий туман	500... 1000	7,82...3,91
4	Слабый туман	1000...2000	3,91... 1,96
5	Дымка	2000...4000	1,96...0,954
6	Легкая дымка	10 000	0,391
7	Ясно	20 000	0,196
8	Очень ясно	50 000	0,078
9	Совершенно ясно	>50 000	<0,078

Для человеческого глаза порог контрастной чувствительности принимают равным 0,02. При этом для $\lambda = 0,55$ мкм $D_v = 3,91 / \gamma_{\lambda 0}$, D_v выражена в км, а γ_v – в км⁻¹. Коэффициент прозрачности для $\lambda = 0,55$ равен:

$$\tau_{a0,55} = \exp(-\gamma_{\lambda 0} l) = \exp(-3,91 l / D_v), \quad (2.7)$$

Иногда для расчета α_a в условиях, когда $S_M > 2$ км и $\lambda < 3$ мкм, пользуются формулой:

$$\gamma_{\lambda} = (3,92 / D_v) (\lambda / 0,6)^{-n}, \quad (2.8)$$

где $n = 0,6$ для плохих погодных условий ($S_M < 6$ км), $n = 1,3$ для средних метеоусловий и $n = 1,6$ для хороших.

2.3 Влияние флуктуаций прозрачности атмосферы на фиксируемую энергетическую светимость очагов самовозгорания

Солнечное излучение, поглощенное земной поверхностью, дает вклад в нагрев слоев воздуха в нижних слоях атмосферы. Плотность воздуха зависит от температурных условий. Атмосферная турбулентность является конвекционным движением газа из-за флуктуаций плотности атмосферы. В общем случае флуктуации показателя преломления атмосферы зависят от тепловых конвекционных потоков воздуха, ветра, гравитационного поля Земли, влажности и т.д. Сложность описания турбулентности связана с тем, что указанные параметры сами меняются случайным образом [106, 107, 108].

Турбулентные движения в атмосфере приводят к созданию оптических неоднородностей, размеры которых могут достигать сотен метров. Чем ближе зона турбулентности к тепловизору, тем увеличивается ее воздействие на результаты дистанционного контроля.

С оптической точки зрения турбулентную среду можно рассматривать как среду, характеризующуюся только вариациями оптического пути. Эти вариации деформируют волновой фронт и ухудшают изображение. Можно представить

турбулентную среду как последовательность примыкающих друг к другу однородных зон с разными показателями преломления. Турбулентность характеризуется геометрическими размерами l этих зон; наименьший размер l_0 определяет внутренний масштаб турбулентности, а наибольший L_0 – внешний масштаб турбулентности $l_0 < l < L_0$. На практике l_0 – величина порядка нескольких миллиметров, а L_0 – нескольких метров [92].

Для анализа влияния турбулентности на распространение излучения очагов самонагрева на поверхности ПО в атмосфере можно воспользоваться функциями, описывающими распределение показателя преломления атмосферы. Вид этих функций зависит от характера турбулентности. Модель Колмогорова-Обухова для однородной турбулентности имеет вид [107]:

$$D_n(r) = C_n^2 l_0^{\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{l_0}\right)^2 \text{ при } 0 < r < l_0; \quad (2.9)$$

$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3} \text{ при } l_0 < r < L_0, \quad (2.10)$$

где r - расстояние между двумя точками случайного поля;

L_0 и l_0 - внешний и внутренний масштабы турбулентности (размеры наименьших и наибольших неоднородностей атмосферы);

C_n^2 — структурная постоянная турбулентности показателя преломления, характеризующая влияние неоднородностей атмосферы на распространение оптического излучения.

Величины l_0 и L_0 зависят от высоты над землей. В приземном слое $L_0 = 5 \dots 10$ мм и $l_0 = 1 \dots 2$ мм, а на высоте H они определяются как $l_0 = (10^{-9}H)^{1/3}$ и $L_0 = (4H)^{1/2}$, если l_0 , L_0 и H выражены в метрах.

Значение C_n^2 зависит от метеорологических условий, времени суток, высоты над землей. Зависимость C_n^2 от высоты H в метрах можно определить как:

$$C_n^2(H) = C_{n0}^2 * H^{4/3}, \quad (2.11)$$

где C_{n0}^2 - структурная постоянная турбулентности показателя преломления на высоте 1 м над поверхностью земли.

В одной из моделей, используемых для расчета C_{n0}^2 , атмосфера разбивается на несколько слоев, внутри каждого из которых величина C_{n0}^2 принимается постоянной: $8,4 \cdot 10^{-15}$ при H от 0 до 18,5 м; $2,87 \cdot 10^{-12}/H^2$ от 18,5 до 110 м; $8,4 \cdot 10^{-15}$ от 110 до 1500 м; $8,87 \cdot 10^{-7}/H^2$ от 1500 до 7200 м; $2,0 \cdot 10^{-16}/H^{1/2}$ от 7200 до 20000 м.

В другой модели (Хюфнагеля-Волли) C_n^2 определяется по формуле [109]:

$$C_n^2(H) = 5,94 \cdot 10^{-53} \left(\frac{v_h}{27}\right) H^{10} \exp\left(-\frac{H}{1000}\right) + 2,7 \cdot 10^{-16} \exp\left(-\frac{H}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{H}{100}\right), \quad (2.12)$$

где v_n средняя скорость ветра на высоте H , $A = 1,7 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Скорость ветра v_n рассчитывается как:

$$v_H = 5 + 30 \exp\left(-\left(\frac{H-9400}{4800}\right)^2\right), \quad (2.13)$$

Влияние турбулентности учитывается лишь в тех случаях, когда время наблюдения превышает атмосферную постоянную времени, которая равна:

$$\tau_{\text{атм}} = 0,058 \left[\frac{\lambda^2}{\sec z \int_H^0 C_n^2(H) v_H^{\frac{5}{3}}(H) dH} \right]^{3/5}, \quad (2.14)$$

где λ -длина волны излучения;

z - угол возвышения линии визирования.

В настоящее время на основе экспериментальных исследований при различных метеорологических условиях было предложено несколько моделей для вычислений значений структурной постоянной пульсации атмосферы. Хорошее совпадение с экспериментом дала регрессионная модель [109]:

$$C_n^2 = a_1 W + b_1 t + c_1 a_{\text{отн}} + c_2 a_{\text{отн}}^3 + c_3 a_{\text{отн}}^3 + d_1 V + d_2 V^2 + d_3 V^3 + e_1, \quad (2.15)$$

где C_n^2 измерена в $\text{м}^{-2/3}$; $a_1, b_1, c_1, \dots, e_1$ - коэффициенты регрессии.

W - коэффициент, учитывающий время наблюдений и зависит от времени суток (табл. 2.4) [91].

Внешний масштаб турбулентности определяется по формуле:

$$L_0 = \kappa z, \quad (2.16)$$

где κ – числовая константа, постоянная Кармана, $\kappa=0,4$;

z – высота над уровнем земли, см.

Табл. 2.4. Зависимость коэффициентов W зависят от времени суток

Интервал, ч	Значение W	Интервал, ч	Значение W
-4...-3	0,011	5...6	1,0
-3...-2	0,07	6...7	0,9
-2...-1	0,08	7...8	0,8
-1...0	0,06	8...9	0,59
0...1	0,05	9...10	0,32
1...2	0,1	10...11	0,22
2...3	0,51	11...12	0,10
3...4	0,75	12...13	0,08
4...5	0,95	13	0,13

Внутренний масштаб турбулентности определяется по формуле:

$$l_0 = \sqrt[4]{\frac{v^3}{\varepsilon}}, \quad (2.17)$$

где v – кинематическая вязкость, $\text{см}^2/\text{с}$;

ε – скорость диссипации энергии турбулентности, $\text{см}^2/\text{с}^{-2}$

Важной характеристикой турбулентного движения является величина скорости диссипации энергии турбулентности [107]:

$$\varepsilon = \frac{v_*^3}{\kappa z}, \quad (2.18)$$

где v_* – скорость потока воздуха, $\text{см}/\text{с}$.

В модели Татарского В.И. [107], структурная постоянная пульсации температуры атмосферы равна:

$$C_T^2 = \frac{0,7}{\beta^2} * \left(\frac{\varepsilon}{z}\right)^{4/3}. \quad (2.19)$$

Следуя рекомендациям еще одной модели оценки влияния турбулентности атмосферы на изменение инфракрасного излучения, тепловизионную съемку рекомендуется проводить при скорости ветра не более 5-7 м/с. Для приблизительного учета влияния скорости ветра в этой модели, измеренные значения температурных перепадов рекомендуется умножать на поправочный коэффициент [110] (табл. 2.5).

Табл. 2.5. Поправочные коэффициенты для различной скорости ветра

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффициент поправки	1,00	1,36	1,64	1,86	2,06	2,23	2,40	2,54

2.4 Влияние ракурса съемки на фиксируемое излучение очагов самовозгорания

Очаги самовозгорания на ПО шахт зачастую находятся на вершине и на боковой поверхности отвалов. Фиксируемое при дистанционном контроле излучение очагов самовозгорания на поверхности ПО меняется в зависимости от ракурса дистанционной съемки.

Дистанционный контроль теплового состояния породных отвалов с использованием беспилотных летательных аппаратов и тепловизоров может фиксировать искаженную энергетическую светимость и, соответственно, температуру очагов самовозгорания.

Энергетическая сила света в заданном ракурсе распределяется по закону Ламберта [111, 112]. Этот закон имеет вид:

$$dI(\alpha) = B dS \cos \alpha, \quad (2.20)$$

где dS — площадь излучающей поверхности, м^2 ;

B — энергетическая яркость, которая не зависит от угла α .

Зависимость энергетической силы света от ракурса съемки графически изображается на плоскости в виде окружности, касающейся поверхности dS , а в пространстве — в виде шаровой поверхности, полученной путем вращения этой окружности вокруг нормали N к dS .

Величина плотности лучистого потока, излучаемого в направлении α в заданном телесном угле $d\Omega$, определяется при помощи закона Ламберта:

$$dR_{\alpha} = dI(\alpha)d\Omega/dS = B \cos \alpha d\Omega. \quad (2.21)$$

Излучение реальных нечерных тел подчиняется закону Ламберта только в ограниченных пределах изменения ракурса (рис. 2.1).

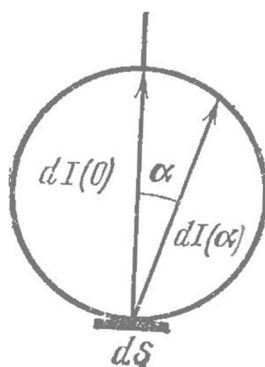


Рис. 2.1. Графическая интерпретация закона Ламберта

В связи с отсутствием достоверных данных о коэффициентах излучения, градиентах температуры и взаимном влиянии поверхностей, с многообразием форм и ориентацией излучающих поверхностей для реальных объектов трудно построить точную индикатрису излучения.

Поэтому объект заменяют совокупностью излучающих поверхностей или участков поверхностей, в пределах которых температуру и коэффициент излучения можно считать постоянными. Поверхности, с незначительным вкладом в суммарное излучение объекта, исключают из рассмотрения. Каждую из поверхностей рассматривают как серый излучатель, подчиняющийся закону

Ламберта, для которого известны температура, коэффициент излучения, площадь и ориентация в пространстве.

Сила света, излучаемого плоской рассеивающей площадкой dS в каком-либо направлении, от угла α между этим направлением и перпендикуляром к dS равна:

$$I_{\alpha} = I_0 \cos \alpha. \quad (2.22)$$

Сила света плоской поверхности максимальна (I_0) по перпендикуляру к ней и, убывая с увеличением ракурса, становится равной нулю в касательных к поверхности направлениях.

Реальные тела рассеивают свет со значительными отклонениями от закона Ламберта. Значительное отклонение от закона Ламберта наблюдается для полированных поверхностей [92]. Наиболее близки к закону Ламберта матовые шероховатые поверхности [92].

Излучение черных и серых тел подчиняется закону Ламберта, где яркость и коэффициент излучения постоянны для любого направления наблюдения.

На практике диэлектрики подчиняются закону Ламберта в интервале углов наблюдения $0 — 60^{\circ}$, а металлы — в интервале углов $0-40^{\circ}$. За пределами этих значений коэффициент излучения быстро уменьшается до нуля при направлении наблюдения по касательной. В случае металлов этому спаду предшествует небольшой подъем [111].

При больших углах дистанционного контроля коэффициент излучения уменьшается из-за роста отражательной способности. Измерение в инфракрасной области яркости и температуры объекта, излучение которого подчиняется закону Ламберта, дает постоянную величину для любого ракурса съемки этого объекта. Когда излучение материала не подчиняется закону Ламберта, его коэффициент излучения уменьшается при углах наблюдения, превышающих 60° , и эффективные температуры становятся меньше действительных [92, 111].

2.5 Определение максимального расстояния дистанционного теплового контроля очагов самовозгорания

ПО имеют значительные размеры, высота некоторых из них превышает 100 м. При дистанционном тепловом контроле ПО с помощью БПЛА и тепловизоров, представляет интерес максимальное расстояние, на котором можно выявить очаги самовозгорания на поверхности породных отвалов на ранней стадии окисления.

Для более полного представления о факторах, влияющих на максимальное расстояние выявления очагов самовозгорания, представим их в виде уравнения [97, 102, 113, 114]:

$$d^2 = S_{\text{ч.т.}} * R * F_{\text{атм.}} * \frac{\varphi_p * tg \alpha * F_{\text{опт.}}}{2 * \sqrt{\Omega}} * D^* * \frac{1}{\sqrt{\Delta y * (\frac{v_s}{v_b})}}, \quad (2.23)$$

где $S_{\text{ч.т.}}$ —площадь очага самовозгорания, вырезаемая мгновенным полем зрения;

R – энергетическая светимость очага самовозгорания, Вт·см⁻²;

$F_{\text{атм.}}$ —пропускание ИК излучения атмосферой;

φ_p —диаметр входного зрачка оптики;

α —апертурный угол оптики;

$F_{\text{опт.}}$ —пропускание ИК излучения оптической системой;

Ω – телесный угол, соответствующий мгновенному полю зрения системы;

D^* - удельная обнаружительная способность;

Δy —ширина электрической полосы пропускания;

V_s —эффективное напряжение электрического сигнала, вызванного потоком;

V_b - эффективное напряжение электрического сигнала, вызванного шумом.

Первые три члена определяются силой излучения очага самовозгорания и пропусканием излучения вдоль линии визирования. Четвертый член содержит различные факторы, характеризующие оптику. Числовая апертура теоретически не может превышать единицу. На практике она редко превосходит значение 0,5.

Увеличение диаметра оптики требует соответствующего увеличения фокусного расстояния. Увеличение фокусного расстояния требует, чтобы линейные размеры приемника были также увеличены для того, чтобы сохранить неизменным поле зрения.

Пятый член характеризует приемник излучения. В связи с тем, что большинство приемников уже приблизилось к теоретическому пределу D^* , достичь увеличения максимальной дальности обнаружения можно лишь в результате защиты приемника от фоновой засветки, а не за счет улучшения самого приемника.

Шестой член содержит факторы, описывающие систему и характеристики обработки сигнала. Он показывает, что уменьшение либо поля зрения, либо полосы частот увеличивает максимальное расстояние выявления очагов самовозгорания, но не очень быстро (зависимость по корню четвертой степени); однако увеличение дальности уменьшает скорость получения информации.

Оценим практическое применение данного метода. Определим максимальное расстояние выявления очага самовозгорания площадью 2000 см^2 и температурой $350,3 \text{ К}$. Для анализа используем характеристики тепловизора Fluke Ti-125. Коэффициент излучения составил $0,95$.

Энергетическую светимость очага самовозгорания рассчитаем по формуле:

$$R = 5,6704 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 \cdot \varepsilon / \pi. \quad (2.24)$$

Диаметр входного зрачка оптики прямо пропорционален минимальному фокусному расстоянию и обратно пропорционален мгновенному полю зрения $\varphi_p = f/1,2$.

Коэффициент, характеризующий пропускание инфракрасного излучения атмосферой равен $F_{\text{атм.}} = 0,998$.

Числовую апертуру оптики рассчитываем по формуле:

$$\text{tg} \alpha = \varphi_p / 2f. \quad (2.25)$$

Коэффициент, характеризующий пропускание ИК излучения оптической системой равен $F_{\text{опт.}} = 0,95$.

Телесный угол, соответствующий мгновенному полю зрения системы равен $\Omega = 0,1024$ стер.

Удельная обнаружительная способность D^* , см*Гц/Вт рассчитывается по формуле:

$$D^* = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{k \cdot \sigma \cdot T^5}}. \quad (2.26)$$

Ширина электрической полосы пропускания равна $\Delta y = 15 \cdot 10^5$ Гц.

Эффективное напряжение электрического сигнала, вызванного потоком и шумом соответственно равны 0,35 В и 0,0014 В.

Проведя расчеты, получим максимальное расстояние выявления очага самовозгорания площадью 2000 см² и температурой 350,3 К на поверхности породного отвала составит 28 км.

Такие расстояния дистанционного теплового контроля характерны для военной промышленности. Для практического применения в горной промышленности целесообразно применять следующую методику определения максимального расстояния выявления очагов самовозгорания.

При определении максимального расстояния выявления очагов самонагревания на поверхности породных отвалов необходимо учитывать три переменных:

1. Поле зрения тепловизора (FOV);
2. Наименьший измеряемый объект (IFOV_{meas}).
3. Наименьший видимый объект (IFOV_{geo}).

Поле зрения (FOV) представляет собой область, видимую тепловизором. Размеры данной площади определяются объективом, используемым с тепловизором. Для оценки используем характеристики того же тепловизора Fluke Ti-125 с объективом 21⁰ и пространственным разрешением 1,2 мрад (IFOV).

С пространственным разрешением 1,2 мрад и расстоянием до измеряемого очага 1 м, наименьший видимый объект (IFOV_{geo}) имеет сторону пикселя равную

1,2 мм. Для получения точных результатов объект должен быть в 2-3 раза больше наименьшего видимого объекта ($IFOV_{geo}$).

$$IFOV_{meas} = 3 IFOV_{geo}; \quad (2.27)$$

$$IFOV_{geo} = IFOV * r; \quad (2.28)$$

$$IFOV_{meas} = IFOV * r * 3. \quad (2.29)$$

Из вышесказанного следует, что при расстоянии до ПО равном 100 м, наименьший видимый объект ($IFOV_{geo}$) будет иметь размер не менее 12 см, а наименьший измеряемый объект ($IFOV_{meas}$) должен иметь размеры не менее 36 см. При температурной съемке объекта с длиной стороны 10 м ($IFOV_{meas}$), максимальная дистанция обнаружения очага самонагрева будет составлять 278 м. При обнаружении очага самонагрева площадью 2000 см^2 (наименьший измеряемый объект) максимальная дистанция обнаружения составит 5600 м. Наименьший видимый объект площадью 2000 см^2 будет обнаружен с дистанции 17 км.

Экспериментальные исследования на ПО шахт Донбасса показали, что очаги тепловыделения на начальной стадии горения зачастую имеют небольшие размеры (0,3-1 м) [2]. При тепловизионных съемках ПО для измерения температуры очага тепловыделения с размером стороны 0,4 м достаточно высоты около 100 м в зависимости от пространственного разрешения тепловизора. Для минимизации влияния внешних факторов и турбулентности потоков воздуха тепловизионную съемку необходимо проводить с наименьшего и безопасного расстояния. Таким образом, в условиях тепловой дистанционной съемки очагов самонагрева на ПО, а в частности выявления их и регистрации температуры очагов самонагрева целесообразно применять метод с обнаружением наименьшего измеряемого объекта.

2.6 Модель влияния основных теплофизических характеристик при дистанционном контроле температуры

Классические решения нестационарной теории теплопроводности включают теплофизические характеристики изделий, их геометрические параметры и параметры нагрева [115]. Учитывая сложность процессов теплообмена между очагом самовозгорания и средой (породой и атмосферой) для их описания применен метод анализа размерностей с учетом дополнения Хантли.

Представим очаг самовозгорания в виде геометрической фигуры с эквивалентным диаметром d (м). Очаг самовозгорания породы, с коэффициентом теплоотдачи за счет теплопроводности α_n (Дж/м²*К*с) и коэффициентом теплопроводности λ_n (Дж/м*К*с) имеет температуру T (К). Тепловой поток Q (Дж/с), проходя через атмосферу с коэффициентом теплоотдачи α_a (Дж/м²*К*с), коэффициентом теплопроводности λ_a (Дж/м*К*с) и скоростью потока воздуха V (м/с), фиксируется тепловизором на расстоянии L (м) с длительностью измерения τ (с) (рис.2.2). Основные параметры взаимодействия очага самовозгорания с окружающей средой и тепловизором, а также их интенсивность показаны в табличной форме (табл.2.2).

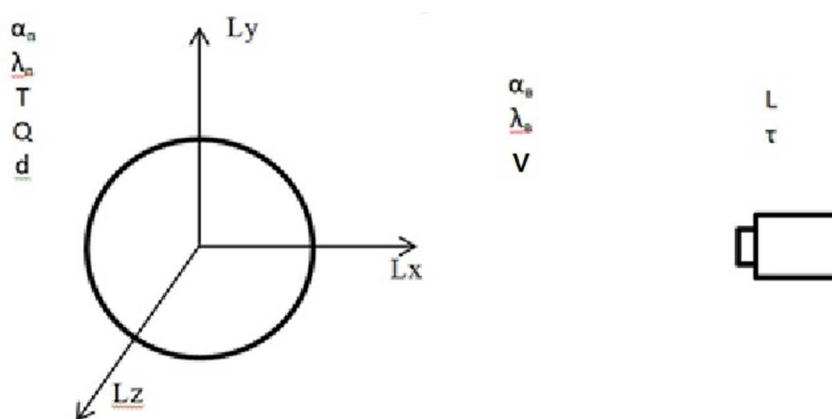


Рис. 2.2. Схема съемки очага самовозгорания тепловизором

Табл. 2.6. Параметры взаимодействия очага самовозгорания с окружающей средой и тепловизором

Параметр	L_x	L_y	L_z	T	Q	τ	n
α_a	-	-	-2	-1	1	-1	1
α_п	-2/3	-2/3	-2/3	-1	1	-1	a
λ_a	-	-	-1	-1	1	-1	b
λ_п	-1/3	-1/3	-1/3	-1	1	-1	c
L	-	-	1	-	-	-	d
D	1/3	1/3	1/3	-	-	-	e
V	1/2	1/2	-	-	-	-1	k

Используя дополнение Хантли, определим фиксируемый коэффициент теплоотдачи в атмосферу:

$$\alpha_a = \alpha_{\Pi}^a * \lambda_a^b * \lambda_n^c * L^d * d^e * V^k. \quad (2.30)$$

При анализе параметров взаимодействия очага самовозгорания с окружающей средой и тепловизором с использованием дополнения Хантли обозначим: a=a; b=b; c=1-b-a; d=b-2; e=1-b+a; K=0.

Параметры взаимодействия очага тепловыделения с окружающей средой и тепловизором представим в виде уравнений:

$$-\frac{2}{3}a - \frac{1}{3}c + \frac{1}{3}e + \frac{1}{2}k = 0; \quad (2.31)$$

$$-\frac{2}{3}a - b - \frac{1}{3}c + d + \frac{1}{3}e = -2; \quad (2.32)$$

$$a + b + c = 1; \quad (2.33)$$

$$a + b + c + k = 1. \quad (2.34)$$

Решив уравнения (2.31-2.34), с учетом экспериментальных данных [44], получим следующие значения степеней уравнения: a=0,5; b=0,167; c=0,333; d=-1,833; e=1,333; k=0.

Уравнение фиксируемого коэффициента теплоотдачи примет вид:

$$\alpha_a = \alpha_{\Pi}^{0,5} * \lambda_a^{0,17} * \lambda_n^{0,33} * L^{-1,83} * d^{1,33}. \quad (2.35)$$

Критерии Нуссельта от очага самовозгорания в атмосферу (Nu_a) и к породе (Nu_{π}) соответственно равны:

$$Nu_{\pi} = \frac{\alpha_{\pi} d}{\lambda_{\pi}}, \quad (2.36)$$

$$Nu_a = \frac{\alpha_a L}{\lambda_a}, \quad (2.37)$$

$$\frac{\alpha_a L}{\lambda_a} = \left(\frac{\alpha_{\pi} d}{\lambda_{\pi}} \right)^a \left(\frac{\lambda_{\pi} d}{\lambda_a L} \right)^{1-b}, \quad (2.38)$$

$$Nu_a = Nu_{\pi}^a \left(\frac{\lambda_{\pi} d}{\lambda_a L} \right)^{1-b}. \quad (2.39)$$

Приведенное к критериальному виду уравнение (2.35) примет вид:

$$\frac{\alpha_a L}{\lambda_a} = \left(\frac{\alpha_{\pi} d}{\lambda_{\pi}} \right)^{0,5} \left(\frac{\lambda_{\pi} d}{\lambda_a L} \right)^{0,83}, \quad (2.40)$$

$$Nu_a = Nu_{\pi}^{0,5} \left(\frac{\lambda_{\pi} d}{\lambda_a L} \right)^{0,83}. \quad (2.41)$$

Установлено, что значение критерия Нуссельта от очага самовозгорания в атмосферу, характеризующее отвод тепла излучением, пропорционально квадратному корню из критерия Нуссельта, характеризующего отвод тепла к породе и, соответственно, зависит от теплопроводных свойств породы и атмосферы [116, 117].

Используя уравнение критериального вида и закон Стефана-Больцмана определим температуру очагов тепловыделения, которая фиксируется при дистанционных методах контроля.

$$T = \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{\alpha_{\pi} d}{\lambda_{\pi}} \right)^{0,5} \left(\frac{\lambda_{\pi} d}{\lambda_a L} \right)^{0,83} * \lambda_a}{\sigma L}}. \quad (2.42)$$

С использованием уравнения критериального вида и закона Стефана-Больцмана установлена величина температурного контраста между очагом самовозгорания и тепловизором (ΔT). Обозначим ΔT и α_a в виде:

$$\Delta T = T_{\Pi} - T_a; \quad (2.43)$$

$$\alpha_a = \sigma(T_{\Pi}^4 - T_a^4), \quad (2.44)$$

где σ - постоянная Стефана — Больцмана ($\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$).

Получим:

$$\alpha_a = \sigma \Delta T * T_{\Pi}^3 \left(1 + \left(\frac{T_a}{T_{\Pi}} \right)^3 + \left(\frac{T_a}{T_{\Pi}} \right)^2 + \frac{T_a}{T_{\Pi}} \right). \quad (2.45)$$

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{\alpha_{\Pi} d}{\lambda_{\Pi}} \right)^{0,5} \left(\frac{\lambda_{\Pi} d}{\lambda_a L} \right)^{0,83} \lambda_a}{T_{\Pi}^3 \left(1 + \left(\frac{T_a}{T_{\Pi}} \right)^3 + \left(\frac{T_a}{T_{\Pi}} \right)^2 + \frac{T_a}{T_{\Pi}} \right) L \sigma}. \quad (2.46)$$

Таким образом, температурный контраст (ΔT) позволяет определить влияние основных факторов на фиксируемую энергетическую светимость дистанционного контроля теплового состояния ГПО.

2.7 Выводы

1. Проведен анализ факторов, оказывающих влияние на энергетическую светимость при дистанционном контроле теплового состояния ПО: поглощение инфракрасного излучения газами, входящими в состав атмосферы; ослабление инфракрасного излучения на частицах в атмосфере; скорость потоков воздуха; изменение ракурса тепловизионной съемки; теплофизические характеристики породы и атмосферы.

2. Основными поглощающими компонентами атмосферы являются углекислый газ и водяной пар. Для учета ослабления инфракрасного излучения на частицах (дымка, дождь, туман, снег, взвешенные вещества) практическое применение получила метеорологическая дальность видимости.

3. При дистанционном контроле очагов тепловыделения необходимо учитывать, что энергетическая сила света диэлектриков в интервале углов наблюдения $0 — 60^\circ$ распределяется по закону Ламберта.

4. Обоснован способ учета оптических характеристик тепловизора при определении максимального расстояния выявления очагов самовозгорания на поверхности ПО.

5. Впервые разработано уравнение критериального вида, которое учитывает основные теплофизические характеристики породы и атмосферы, влияющие на дистанционное измерение теплового состояния очагов самовозгорания на ПО.

6. Значение критерия Нуссельта от очага самонагревания в атмосферу (Nu_a), характеризующее отвод тепла излучением, пропорционально квадратному корню из критерия Нуссельта, характеризующего отвод тепла к породе (Nu_n) и, соответственно зависит от теплопроводных свойств породы и атмосферы.

РАЗДЕЛ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ МЕТОДЕ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

3.1 Методика лабораторных исследований

Для исследования температурного состояния объекта и выявления зависимостей при дистанционном способе контроля температуры были проведены лабораторные исследования.

Основными задачами исследований является установление зависимостей между следующими параметрами:

- а) фиксируемой дистанционными методами энергетической светимостью объекта исследования и расстоянием съемки.
- б) фиксируемой дистанционными методами энергетической светимостью и ракурсом съемки.
- с) скоростью воздуха и энергетической светимостью объекта тепловыделения.
- д) формой объекта температурной съемки и его энергетической светимостью.

В качестве объекта исследования использовался нагревательный прибор (электрическая плитка).

При выяснении влияния формы объекта температурной съемки на показатели температуры использовались картонные экраны с отверстиями различной геометрической формы (круг, овал, прямоугольник горизонтальный и вертикальный, овал, щель вертикальная и горизонтальная) (рис.3.1). Площадь отверстий в экранах была постоянной - $0,5 \text{ м}^2$. При исследовании влияния скорости потока воздуха использовался бытовой вентилятор.

Согласно «ГОСТР 56511- 2015. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования» и другим стандартам [118, 119, 120, 121] определены основные термины лабораторного исследования:

Тепловизор - прибор, предназначенный для преобразования теплового изображения в видимое.

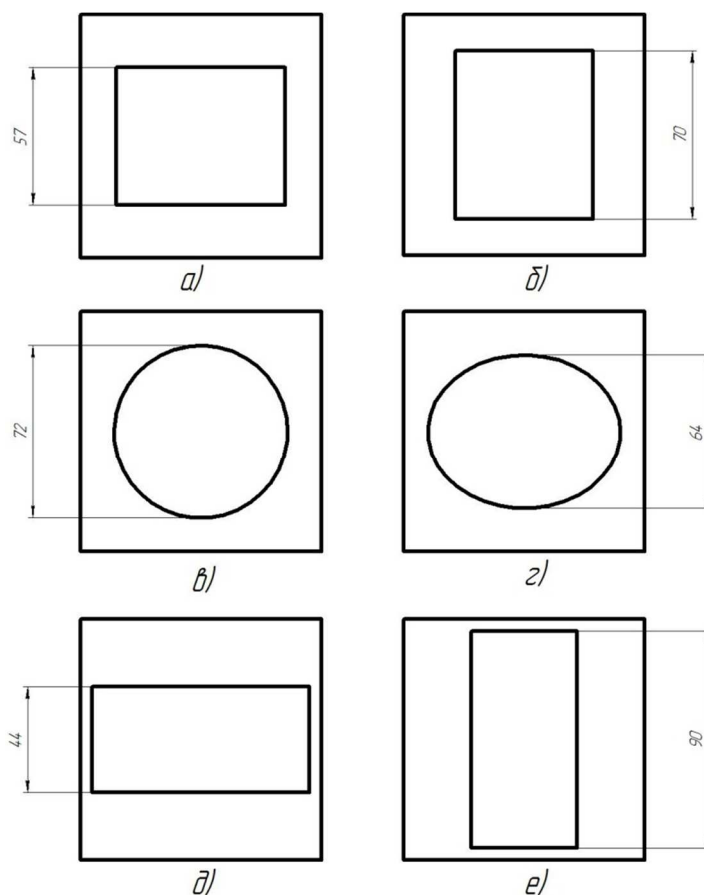


Рис. 3.1. Схемы экранов разной геометрической формы: а) прямоугольник горизонтальный; б) прямоугольник вертикальный; в) круг; г) овал; д) щель горизонтальная; е) щель вертикальная.

Температурное поле объекта исследования - совокупность мгновенных значений температуры во всех точках поверхности объекта анализа или его отдельного участка.

Активный метод теплового анализа - метод теплового анализа, при котором объект анализа подвергается воздействию внешнего источника тепловой энергии.

Пассивный метод теплового анализа - метод теплового анализа, при котором объект не подвергается воздействию внешнего источника тепловой энергии.

Односторонний метод теплового анализа - активный метод теплового анализа, при котором источник нагрева объекта анализа и средство регистрации теплового излучения расположены по одну сторону объекта анализа.

Двусторонний метод теплового анализа - активный метод теплового анализа, при котором источник нагрева объекта анализа и средство регистрации теплового излучения расположены с противоположных сторон объекта анализа.

В лабораторных исследованиях использовался односторонний метод теплового анализа.

В процессе лабораторных исследований использовались: тепловизор Land Cyclops Ti-814, аспирационный психрометр М-34, ручной чашечный анемометр МС-13 в соответствии с ГОСТ 6376-74, измерительная металлическая рулетка в соответствии с ГОСТ 7502-80, барометр бытовой; вентилятор, нагревательный прибор (электрическая плитка), лист из стали (толщина 1,5 мм, размеры 1,5 м х 2,7 м), экраны (прямоугольник, круг, овал, щель).

При решении задачи с определением влияния основных факторов воздействия на фиксируемую тепловизором энергетическую светимость осуществлялся полный факторный эксперимент 2^4 (табл.3.1).

Табл. 3.1 Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	-	-	-	+	y_1
2	+	-	-	+	y_2
3	-	+	-	+	y_3
4	-	-	+	+	y_4
5	-	-	-	-	y_5
6	+	-	-	-	y_6
7	-	+	-	-	y_7
8	-	-	+	-	y_8
9	+	+	-	-	y_9
10	+	-	+	-	y_{10}
11	+	-	-	+	y_{11}
12	-	+	+	-	y_{12}
13	+	-	+	+	y_{13}
14	-	+	+	+	y_{14}
15	+	+	+	-	y_{15}
16	+	+	+	+	y_{16}

В качестве факторов x_1 , x_2 , x_3 , x_4 выбраны расстояние, ракурс съемки, турбулентность атмосферы и форма объекта тепловыделения. В качестве отклика эксперимента используется энергетическая светимость объекта тепловыделения.

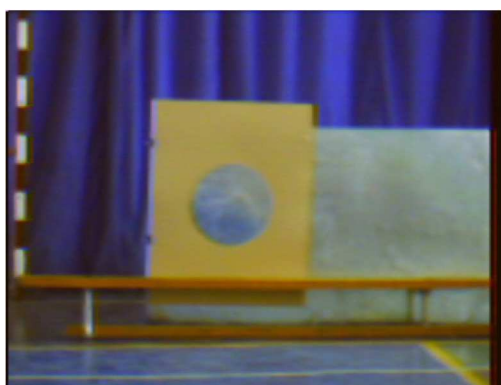
При планировании эксперимента использовалось кодированное значение факторов +1 и -1. Число опытов, необходимых для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов, определяем по формуле $N = 2^k$, где число факторов k равно 4; $N = 2^4 = 16$ (опытов).

Проведение измерений

1. В лабораторном помещении, на высоте от уровня пола помещения - 0,5 м, устанавливали вертикально нагревательный прибор с температурой 125 °С.

К нему вплотную прикрепляли лист из стали. К листу из стали вплотную устанавливали экраны, таким образом, чтобы экран имел одинаковые размеры с листом из стали и прилегал к нему (рис. 3.2). Использовались экраны различных форм: прямоугольник горизонтальный и вертикальный, круг, овал, щель горизонтальная и вертикальная.

Лабораторный эксперимент проводили при использовании каждого экрана. Схема расположения объектов лабораторного эксперимента приведена на рис. 3.3.



а)



б)

Рис. 3.2. Расположение объекта тепловыделения (экран круг, дистанция 3 м (а); экран овал, дистанция 15 м (б)) в лабораторном помещении.

2. В помещении для лабораторных исследований измеряли температуру и влажность воздуха. Также измеряли атмосферное давление. Показания фиксировали.

3. Тепловизор устанавливали и настраивали в соответствии с инструкцией его эксплуатации. Коэффициент излучения для листа из стали равен 0,98.

4. Лист из стали с экраном нагревался до стабильной температуры. На минимально допустимом расстоянии от объекта тепловыделения (3 м) настроенным, в соответствии с инструкцией эксплуатации, тепловизором проводили съемку. С увеличением дистанции до 27 м с шагом 3 м температурную съемку повторяли. Фиксировали максимальную энергетическую светимость объекта тепловыделения.

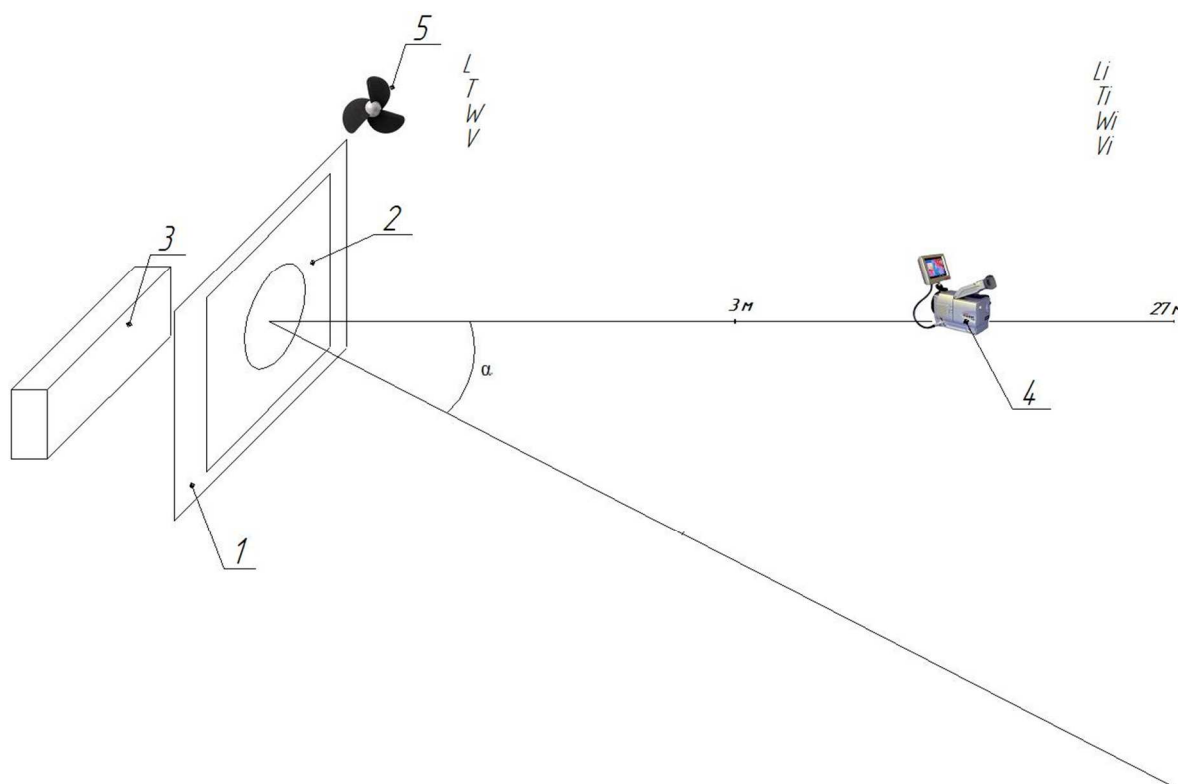


Рис. 3.3. Схема расположения объектов лабораторного эксперимента

1 – лист из стали; 2 – картонный экран; 3 – нагревательный прибор; 4 – тепловизор; 5 – вентилятор; α – ракурс съемки; L , T , W , V – дистанция, температура объекта исследования, относительная влажность и скорость потоков воздуха соответственно; L_i , T_i , W_i , V_i – фиксируемые дистанция, температура объекта исследования, относительная влажность и скорость потоков воздуха для i -той дистанции соответственно

5. Лабораторные исследования проводили при ракурсах съемки 30° , 60° , 90° и 45° относительно перпендикуляра к нагревательному прибору.

При каждом ракурсе съемки, на минимально допустимом расстоянии от нагревательного прибора (3 м) тепловизором проводили съемку. С увеличением дистанции до 27 м с шагом 3 м температурная съемка повторялась. Показатели фиксировали.

6. Для создания потока воздуха использовался бытовой вентилятор, который поочередно устанавливали за нагревательным прибором, слева и справа от него. Расстояние между вентилятором и нагревательным прибором или тепловизором составляло 1 м.

Эксперимент проводили при различных скоростях воздуха. При каждой скорости потоков воздуха, на минимально допустимом расстоянии от объекта тепловыделения проводилась съемка с ракурсом - 90° . При увеличении расстояния до 27 м с шагом 3 м температурная съемка повторялась. Показатели фиксировались.

3.2 Влияние расстояния тепловизионной съемки на фиксируемую энергетическую светимость

Согласно разработанной в настоящей работе методике были проведены лабораторные исследования [122]. Температура воздуха в опытном помещении составляла $16,7^{\circ}\text{C}$, относительная влажность - 62%.

Рассмотрим тепловизионную съемку нагревательного прибора при использовании различных экранов и расстояний съемки при ракурсе 90° (рис. 3.4).

Значения энергетической светимости (R , Дж / (с·м²·К⁴)), фиксируемой тепловизором, при ракурсе съемки 90° , различных формах источника тепла и расстояниях съемки приведены в Приложении Б.

Энергетическая светимость, полученная в результате лабораторных исследований при ракурсе 90° , была обработана с расчетом статистических показателей и проверкой на однородность и достоверность [123].

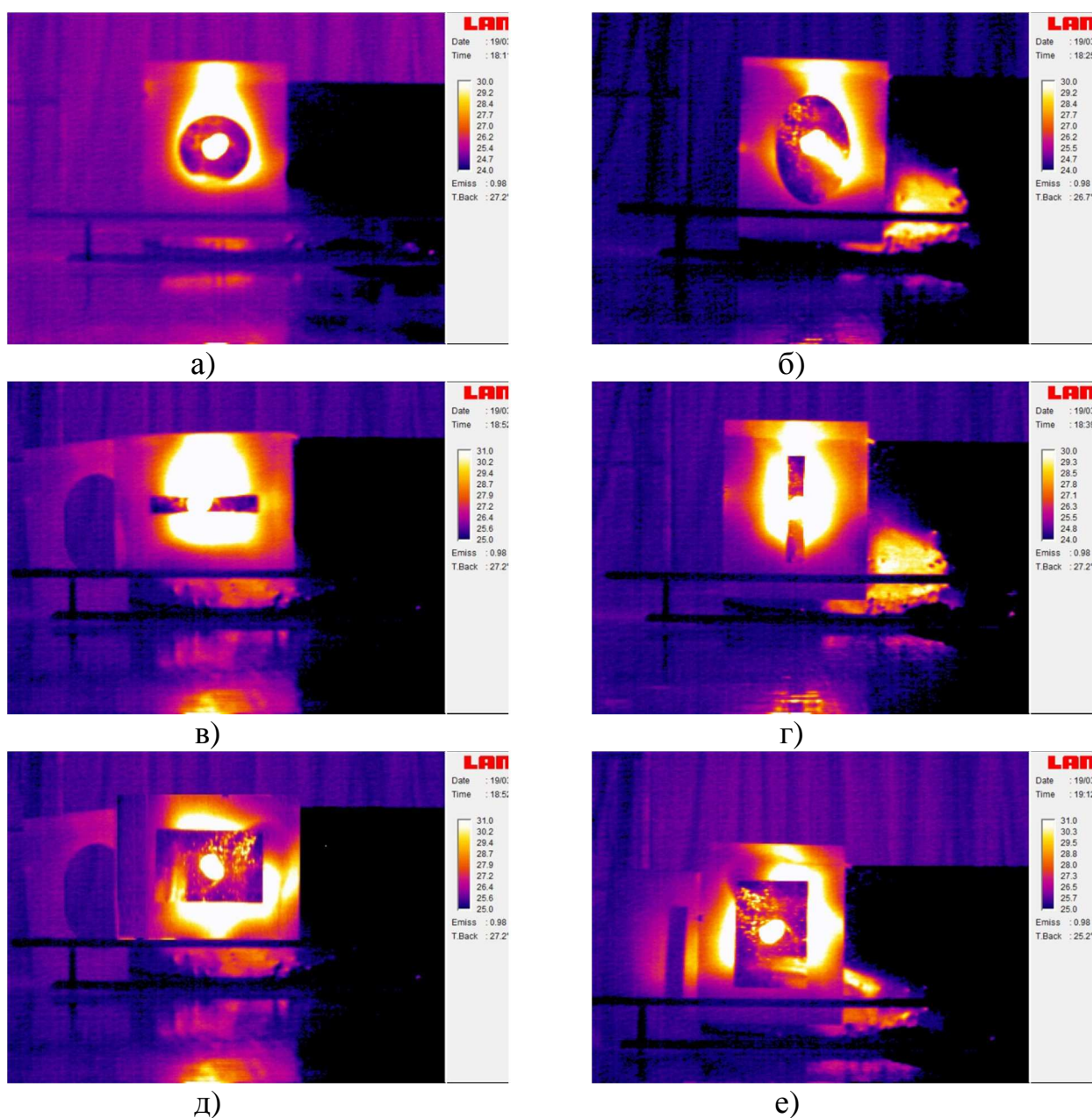


Рисунок 3.4. Тепловизионные фотографии лабораторных исследований при расстоянии съемки 9 м и ракурсе 90^0 с использованием различных экранов: а) круг; б) овал; в) щель горизонтальная; г) щель вертикальная; д) прямоугольник горизонтальный; е) прямоугольник вертикальный.

Проверка на однородность проводилась при помощи критерия Стьюдента. Данные считаются однородными, если расчетное значение критерия Стьюдента (t_{ϕ}) меньше теоретического (t_r) (гипотеза H_0):

$$t_{\phi} = (X_{\text{экстр.}} - X_{\text{ср.}})/S. \quad (3.1)$$

При $t_{\phi} < t_T$ проверяемое значение однородно с генеральной совокупностью и не исключается. При $t_{\phi} \geq t_T$ проверяемое сомнительное значение исключается из генеральной совокупности, это гипотеза H_1 .

При проверке на однородность с помощью критерия Стьюдента были исключены сомнительные результаты лабораторных исследований при ракурсе 90^0 (табл. 3.2).

Табл. 3.2. Проверка однородности данных при помощи критерия Стьюдента

Показатели	Этапы расчета	
	1	2
$X_{\text{ср}}$ (среднее)	775	779
S (стандартное отклонение)	43	40
$X_p(\text{max})$	873	857
t_{ϕ}	2,28	1,97
t_T	2,01	2,02
Вид гипотезы	H_1	H_0
$X_p(\text{min})$	713	-
t_{ϕ}	1,44	-
t_T	2,01	-
Вид гипотезы	H_0	-

Для проверки данных на достоверность определим соответствие генеральной совокупности нормальному закону распределения. Гистограмма позволяет сделать предварительное суждение о плотности распределении результатов исследований при ракурсе 90^0 (рис. 3.5).

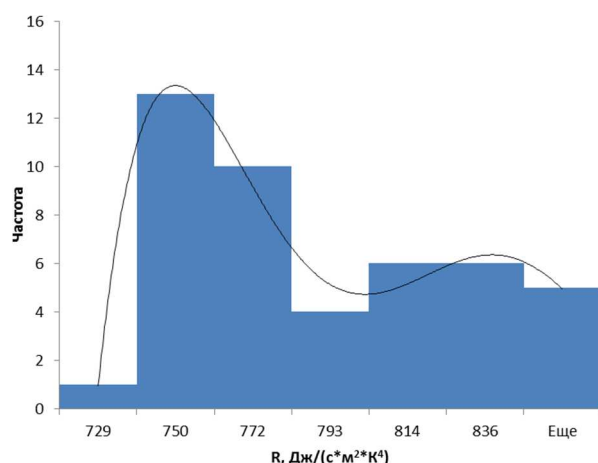


Рис. 3.5. Гистограмма плотности распределения результатов исследований при ракурсе 90^0

Исходя из гистограммы, можно предположить, что генеральная совокупность результатов исследований при ракурсе 90^0 распределяется по нормальному закону.

При проверке данных на достоверность выдвигаются основная и вспомогательная гипотезы. Вспомогательная гипотеза основывается на коэффициенте вариации, рассчитанном по данным наблюдений. Для условий лабораторных исследований с ракурсом 90^0 , коэффициент вариации составил 5 %, что соответствует распределению генеральной совокупности по нормальному закону (менее 33%).

Основная гипотеза выдвигается по значениям асимметрии и эксцесса при условии, что $A < 3(6/n)^{1/2}$ и $E < (24/n)^{1/2}$ (А- асимметрия; Е – эксцесс; n – число опытов). Расчет асимметрии и эксцесса показал верность гипотезы H_0 по значениям асимметрии и эксцесса (табл.3.3). Энергетическая светимость, определенная при лабораторных исследованиях с ракурсом 90^0 достоверна.

Табл. 3.3. Расчет достоверности результатов исследований с ракурсом 90^0

Опыт	Показатели и выдвигаемая гипотеза							
	А	Е	$3\sigma_a$	$3\sigma_e$	по значению А		по значению Е	
					H_0 , если $A < 3\sigma_a$	H_1 , если $A > 3\sigma_a$	H_0 , если $E < 3\sigma_e$	H_1 , если $E > 3\sigma_e$
Лабораторные исследования	0,500	-0,868	1,095	2,191	+	-	+	-

Наиболее точным доказательством соответствия данных нормальному закону распределения является количественное подтверждение гипотезы о достоверности с помощью критерия χ^2 Пирсона. Если фактическое значение критерия χ^2 меньше теоретического ($\chi^2_{\text{ф}} < \chi^2_{\text{т}}$) – гипотеза H_0 , данные достоверны; $\chi^2_{\text{ф}} > \chi^2_{\text{т}}$ – гипотеза H_1 , данные недостоверны.

Теоретические частоты рассчитываем с помощью плотности вероятности. Результаты расчета эмпирических границ интервала, конца интервала, его

среднего значения, новых границ каждого интервала, теоретических частот и расчет фактического значения χ^2 Пирсона приведены в таблице 3.4.

Табл. 3.4. Расчет фактического значения χ^2 Пирсона для результатов исследований с ракурсом 90^0

Исх. границы интервалов		Ср. значения интервалов, X_i	Эмпирические частоты, m_i	Новые границы		t_i	$f(t)$	m_i	$(m_i - m_{icp})^2 / m_{icp}$
X_{i-1}	X_{i+1}			t_{i-1}	t_{i+1}				
750	729	740	8	-0,72	-1,26	-0,99	0,243	5,900	0,75
772	750	761	7	-0,19	-0,72	-0,46	0,360	8,717	0,34
793	772	761	5	0,35	-0,19	0,08	0,398	9,637	2,23
814	793	782	6	0,89	0,35	0,62	0,329	7,971	0,49
836	814	804	8	1,43	0,89	1,16	0,204	4,934	1,90
Сумма									5,7

Гипотеза о соответствии генеральной совокупности нормальному закону распределения подтверждается, т.к. при 5% уровне значимости и степени свободы $5-3=3$ теоретическое значение $\chi^2_{\tau} = 5,99$ меньше фактического значения χ^2 Пирсона, т.е. $\chi^2_{\phi} > \chi^2_{\tau}$ ($5,7 < 5,99$). При увеличении расстояния тепловизионной съемки (L , м) с ракурсом съемки 90^0 , энергетическая светимость (R , Дж / ($\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4$)) уменьшается по степенной зависимости с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,89$ (рис. 3.6):

$$R_{90} = 0,943 \cdot 10^3 L^{-0,079}. \quad (3.2)$$

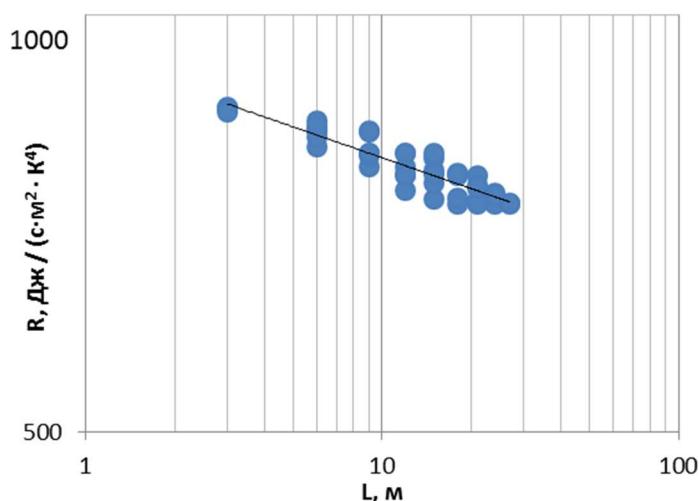


Рис. 3.6. Зависим энергетической светимости от расстояния съемки (L) ракурсе 90^0

Тепловизионные фотографии лабораторных исследований при расстоянии съемки 9 м и ракурсе съемки 30° приведены на рисунке 3.7.

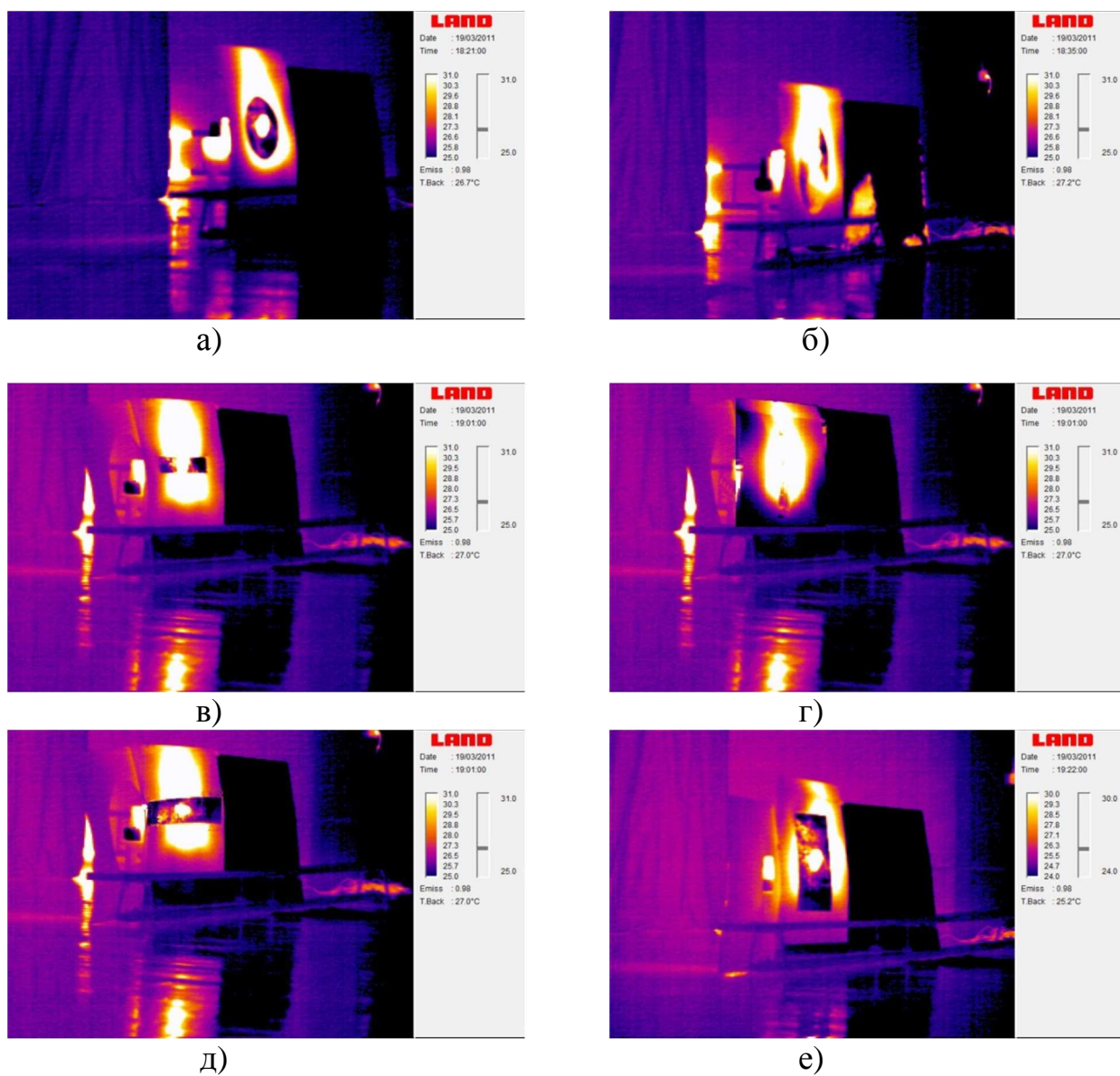


Рис. 3.7. Тепловизионные фотографии лабораторных исследований при расстоянии съемки 9 м и ракурсе 30° с использованием различных экранов: а) круг; б) овал; в) щель горизонтальная; г) щель вертикальная; д) прямоугольник горизонтальный; е) прямоугольник вертикальный.

Значения энергетической светимости (R , Дж / (с·м²·К⁴)), фиксируемой тепловизором, при ракурсе съемки 30° , различных формах источника тепла и расстояниях съемки приведены в Приложении Б.

Энергетическая светимость, полученная в результате лабораторных исследований при ракурсе 30^0 , была обработана с расчетом статистических показателей и проверкой на однородность и достоверность.

При проверке на однородность с помощью критерия Стьюдента были исключены сомнительные результаты лабораторных исследований (табл. 3.5).

Табл. 3.5. Проверка однородности данных при помощи критерия Стьюдента результатов исследований с ракурсом 30^0

Показатели	Этапы расчета	
	1	2
\bar{X} (среднее)	811	806
S (стандартное отклонение)	48	46
$X_p(\max)$	920	894
t_{ϕ}	2,27	1,93
t_r	2,04	2,02
Вид гипотезы	H_1	H_0
$X_p(\min)$	729	-
t_{ϕ}	1,7	-
t_r	2,04	-
Вид гипотезы	H_0	-

Для проверки данных на достоверность определим их соответствие нормальному закону распределения. Гистограмма позволяет сделать предварительное суждение о плотности распределении генеральной совокупности при ракурсе 30^0 (рис. 3.8).

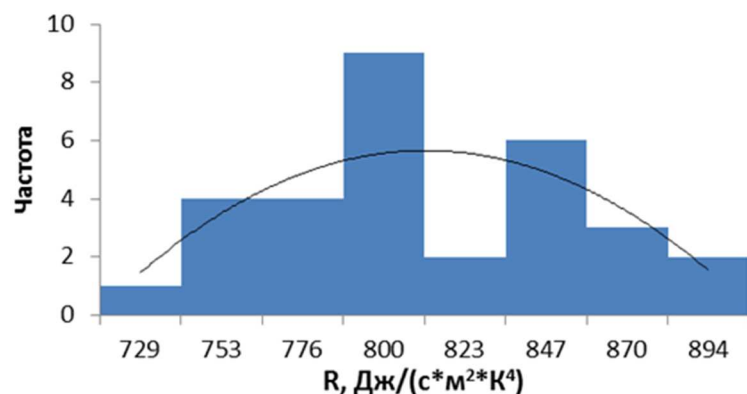


Рис. 3.8. Гистограмма плотности распределения результатов исследований при ракурсе 30^0

Основная гипотеза выдвигается по значениям асимметрии и эксцесса. Расчет асимметрии и эксцесса показал верность гипотезы H_0 по значениям

асимметрии и эксцесса (табл. 3.6). Энергетическая светимость, определенная при лабораторных исследованиях с ракурсом 30^0 достоверна.

Табл. 3.6. Расчет достоверности результатов исследований с ракурсом 30^0

Опыт	Показатели и выдвигаемая гипотеза							
	А	Е	$3\sigma_a$	$3\sigma_e$	по значению А		по значению Е	
					H_0 , если $A < 3\sigma_a$	H_1 , если $A > 3\sigma_a$	H_0 , если $E < 3\sigma_e$	H_1 , если $E > 3\sigma_e$
Ракурс 30^0	0,221	-0,941	1,299	2,598	+	-	+	-

При проверке достоверности с помощью критерия χ^2 Пирсона, гипотеза о соответствии результатов исследований при ракурсе 30^0 нормальному закону распределения подтверждается, т.к. теоретическое значение $\chi^2_{\tau} = 9,49$ меньше фактического значения χ^2 Пирсона, т.е. $\chi^2_{\phi} > \chi^2_{\tau}$ ($8,94 < 9,49$) (табл. 3.7).

Табл. 3.7. Расчет фактического значения χ^2 Пирсона при ракурсе 30^0

Исх. границы интервалов		Ср. значения интервалов, X_i	Эмпирические частоты, m_i	Новые границы		t_i	$f(t)$	m_i	$(m_i - micp)^2 / micp$
X_{i-1}	X_{i+1}			t_{i-1}	t_{i+1}				
753	729	741	3	-1,16	-1,67	-1,41	0,147	2,838	0,01
776	753	764	4	-0,64	-1,16	-0,90	0,266	5,143	0,25
800	776	764	0	-0,13	-0,64	-0,38	0,371	7,153	7,15
823	800	788	6	0,39	-0,13	0,13	0,396	7,638	0,35
847	823	812	5	0,90	0,39	0,64	0,324	6,261	0,25
870	847	835	5	1,42	0,90	1,16	0,204	3,940	0,29
894	870	859	3	1,93	1,42	1,67	0,099	1,903	0,63
Сумма									8,94

При увеличении расстояния тепловизионной съемки (L, m) при ракурсе съемки 30^0 , энергетическая светимость ($R, Дж / (с \cdot м^2 \cdot K^4)$) уменьшается по степенной зависимости с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,89$ (рис. 3.9):

$$R_{90} = 0,980 \cdot 10^3 L^{-0,091}. \quad (3.3)$$

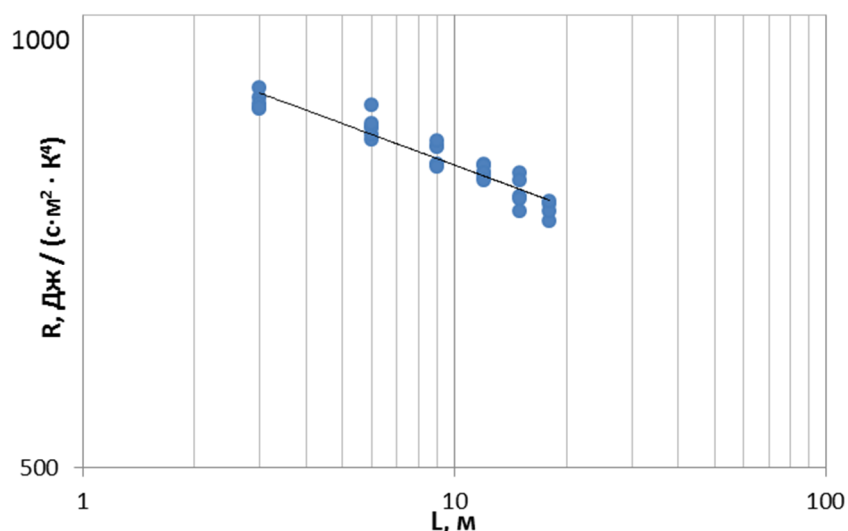


Рис. 3.9. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния съемки (L) при ракурсе 30°

Тепловизионные фотографии лабораторных исследований с использованием различных экранов при расстоянии съемки 9 м и ракурсе 45° приведены на рисунке 3.10. Энергетическая светимость (R, Дж / (с·м² · К⁴)), фиксируемая тепловизором, при ракурсе съемки 45°, различных формах источника тепла и расстояниях съемки приведена в Приложении Б.

Энергетическая светимость, полученная в результате лабораторных исследований при ракурсе 45°, была обработана с расчетом статистических показателей и проверкой на однородность и достоверность. При проверке на однородность с помощью критерия Стьюдента были исключены сомнительные результаты лабораторных исследований (табл. 3.8).

Табл. 3.8. Проверка однородности результатов исследований с ракурсом 45° при помощи критерия Стьюдента

Показатели	Этапы расчета	
	1	2
Хср (среднее)	822	825
S (стандартное отклонение)	45	47
Хр(max)	921	921
t _ф	2,20	2,04
t _г	2,06	2,07
Вид гипотезы	H ₁	H ₀
Хр(min)	749	-
t _ф	1,43	-
t _г	2,04	-
Вид гипотезы	H ₀	-

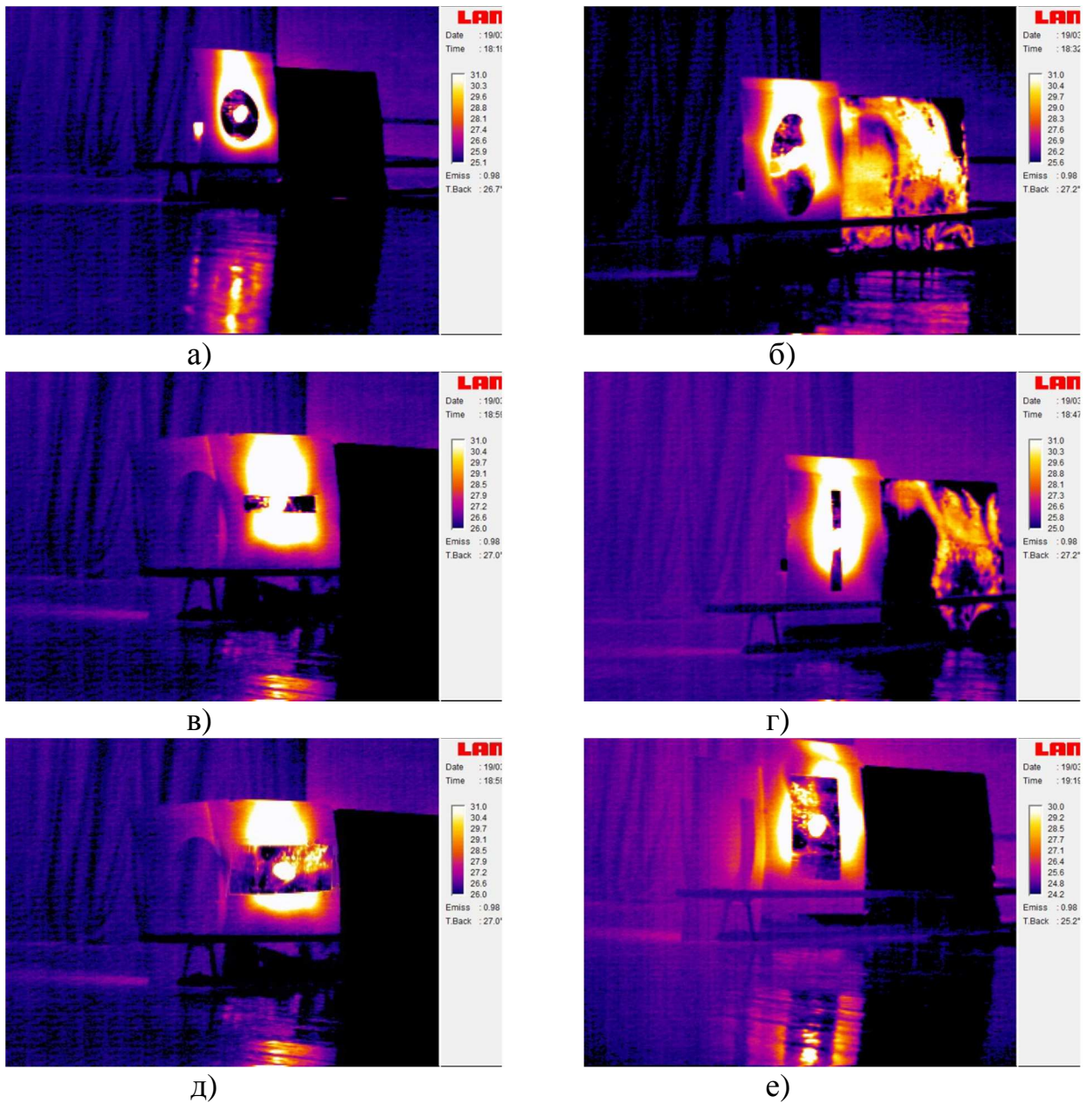


Рис. 3.10. Тепловизионные фотографии лабораторных исследований при расстоянии съемки 9 м и ракурсе 45° с использованием различных экранов: а) круг; б) овал; в) щель горизонтальная; г) щель вертикальная; д) прямоугольник горизонтальный; е) прямоугольник вертикальный.

Для проверки данных на достоверность определим их соответствие нормальному закону распределения (рис. 3.11).

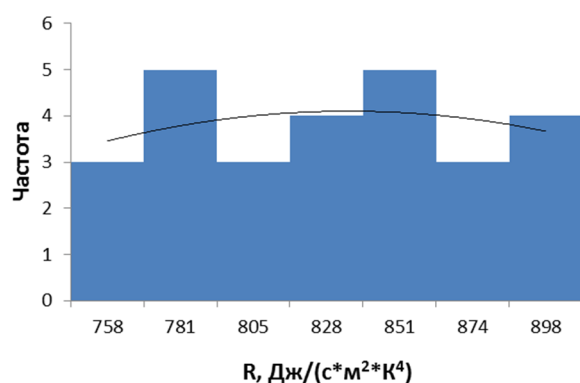


Рис. 3.11. Гистограмма плотности распределения результатов исследований при ракурсе 45^0

Исходя из гистограммы, можно предположить, что результаты исследований при ракурсе 45^0 распределяются по нормальному закону. Для условий лабораторных исследований, коэффициент вариации составил 6 %, что соответствует распределению генеральной совокупности по нормальному закону.

Основная гипотеза выдвигается по значениям асимметрии и эксцесса. Расчет асимметрии и эксцесса показал верность гипотезы H_0 по значениям асимметрии и эксцесса (табл.3.9). Энергетическая светимость, определенная при лабораторных исследованиях с ракурсом 45^0 достоверна.

Табл. 3.9. Расчет достоверности результатов исследований с ракурсом 45^0

Опыт	Показатели и выдвигаемая гипотеза							
	A	E	$3\sigma_a$	$3\sigma_e$	по значению A		по значению E	
					H_0 , если $A < 3\sigma_a$	H_1 , если $A > 3\sigma_a$	H_0 , если $E < 3\sigma_e$	H_1 , если $E > 3\sigma_e$
Ракурс 45^0	0,366	-0,784	1,500	3,000	+	-	+	-

При проверке достоверности с помощью критерия χ^2 Пирсона, гипотеза о соответствии генеральной совокупности нормальному закону распределения подтверждается, т.к. теоретическое значение $\chi^2_{\text{т}} = 9,49$ меньше фактического значения χ^2 Пирсона, т.е. $\chi^2_{\text{ф}} > \chi^2_{\text{т}}$ ($8,69 < 9,49$) (табл. 3.10).

Табл. 3.10. Расчет фактического значения χ^2 Пирсона при лабораторных исследованиях с ракурсом 45°

Исх. границы интервалов		Ср. значения интервалов, X_i	Эмпирические частоты, m_i	Новые границы		t_i	$f(t)$	m_i	$(m_i - m_{icp})^2 / m_{icp}$
X_{i-1}	X_{i+1}			t_{i-1}	t_{i+1}				
781	758	770	3	-0,93	-1,43	-1,18	0,198	2,977	0,00
805	781	793	5	-0,44	-0,93	-0,69	0,315	4,733	0,02
828	805	793	3	0,06	-0,44	-0,19	0,392	5,883	1,41
851	828	816	4	0,55	0,06	0,31	0,381	5,716	0,51
874	851	840	5	1,05	0,55	0,80	0,289	4,340	0,10
898	874	863	3	1,55	1,05	1,30	0,172	2,576	0,07
921	898	886	4	2,04	1,55	1,80	0,080	1,195	6,58
Сумма									8,69

При увеличении расстояния тепловизионной съемки (L , м) при ракурсе съемки 45° , энергетическая светимость (R , Дж / (с·м² · К⁴)) уменьшается по степенной зависимости с коэффициентом детерминации $R^2=0,90$ (рис. 3.12):

$$R_{90}=0,980 \cdot 10^3 L^{-0,089} \quad (3.4)$$

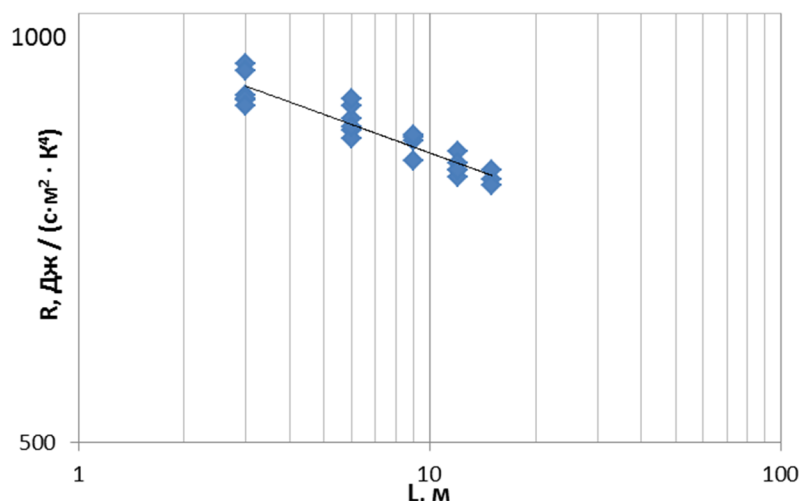


Рис. 3.12. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния съемки (L) при ракурсе 45°

Тепловизионные фотографии лабораторных исследований с использованием различных экранов при расстоянии съемки 9 м и ракурсе 60° приведены на рисунке 3.13. Энергетическая светимость (R , Дж / (с·м² · К⁴)), фиксируемая тепловизором, при ракурсе съемки 60° , различных формах источника тепла и расстояниях съемки приведена в Приложении Б.

Энергетическая светимость, полученная в результате лабораторных исследований при ракурсе 60^0 , также была обработана с расчетом статистических показателей и проверкой на однородность и достоверность.

При проверке на однородность с помощью критерия Стьюдента установлено, что генеральная совокупность данных при ракурсе 60^0 однородна ($t_f < t_T$) как при максимальном так и при минимальном значении энергетической светимости. Для проверки данных на достоверность определим их соответствие нормальному закону распределения.

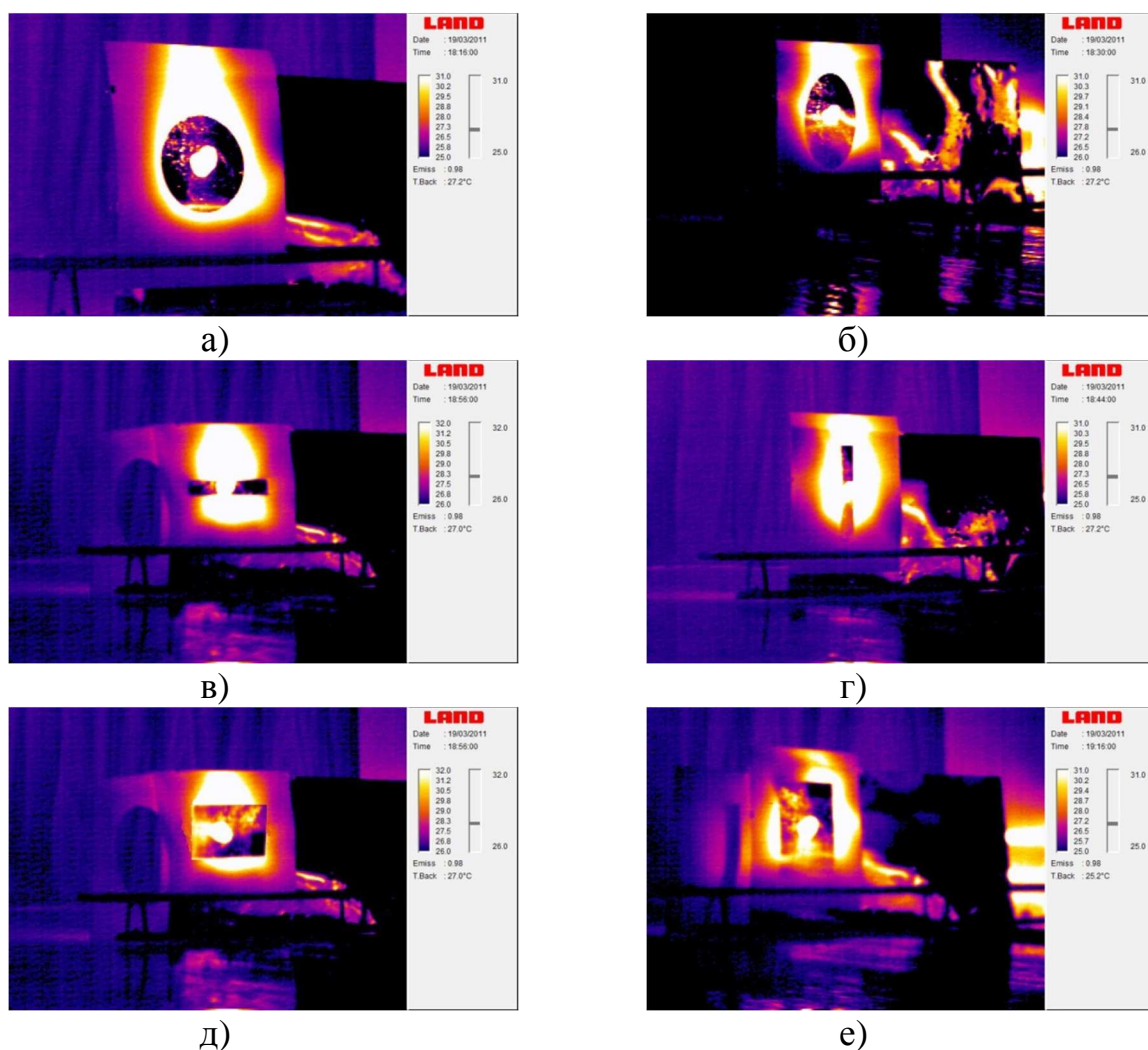


Рисунок 3.13 – Тепловизионные фотографии лабораторных исследований при дистанции съемки 9 м и ракурсе 60^0 с использованием различных экранов: а) круг; б) овал; в) щель горизонтальная; г) щель вертикальная; д) прямоугольник горизонтальный; е) прямоугольник вертикальный.

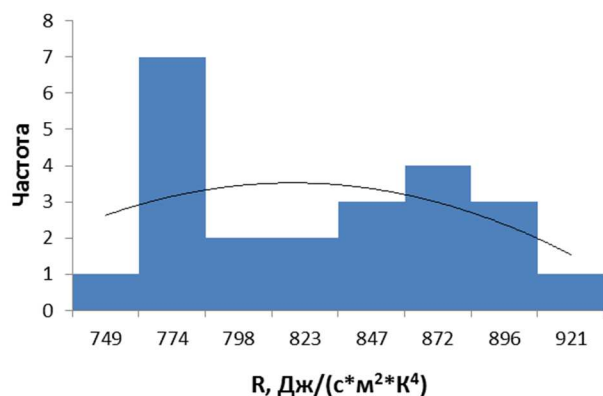


Рис. 3.14. Гистограмма плотности распределения генеральной совокупности при ракурсе 60^0

Исходя из гистограммы (рис. 3.14), можно предположить, что генеральная совокупность при ракурсе 60^0 распределяется по нормальному закону. Для условий лабораторных исследований, коэффициент вариации составил 7 %. Расчет асимметрии и эксцесса показал верность гипотезы H_0 по значениям асимметрии и эксцесса (табл.3.11). Энергетическая светимость, определенная при лабораторных исследованиях с ракурсом 60^0 достоверна.

Табл. 3.11. Расчет достоверности данных

Опыт	Показатели и выдвигаемая гипотеза							
	A	E	$3\sigma_a$	$3\sigma_e$	по значению A		по значению E	
					H_0 , если $A < 3\sigma_a$	H_1 , если $A > 3\sigma_a$	H_0 , если $E < 3\sigma_e$	H_1 , если $E > 3\sigma_e$
Ракурс 60^0	0,229	-1,315	1,500	3,000	+	-	+	-

При проверке достоверности с помощью критерия χ^2 Пирсона, гипотеза о соответствии результатов исследований с ракурсом 60^0 нормальному закону распределения подтверждается, т.к. при 5% уровне значимости и степени свободы $7-3=4$ теоретическое значение $\chi^2_{\tau} = 9,49$ меньше фактического значения χ^2 Пирсона, т.е. $\chi^2_{\phi} > \chi^2_{\tau}$ ($8,34 < 9,49$) (табл. 3.12).

Табл. 3.12. Расчет фактического значения χ^2 Пирсона при лабораторных исследованиях с ракурсом 60°

Исх. границы интервалов		Ср. значения интервалов, X_i	Эмпирические частоты, m_i	Новые границы		t_i	$f(t)$	m_i	$(m_i - m_{icp})^2 / m_{icp}$
X_{i-1}	X_{i+1}			t_{i-1}	t_{i+1}				
774	749	761	3	-0,89	-1,34	-1,11	0,215	2,937	0,00
798	774	786	6	-0,43	-0,89	-0,66	0,321	4,383	0,60
823	798	786	3	0,02	-0,43	-0,21	0,390	5,335	1,02
847	823	810	2	0,47	0,02	0,24	0,387	5,294	2,05
872	847	835	3	0,92	0,47	0,69	0,313	4,284	0,38
896	872	860	2	1,37	0,92	1,15	0,207	2,826	0,24
921	896	884	4	1,82	1,37	1,60	0,111	1,520	4,04
Сумма									8,34

При увеличении расстояния тепловизионной съемки (L , м) при ракурсе съемки 60° , энергетическая светимость (R , Дж / (с·м² · К⁴)) уменьшается по степенной зависимости с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$ (рис. 3.15):

$$R_{90} = 1,014 \cdot 10^3 L^{-0,11} \quad (3.5)$$

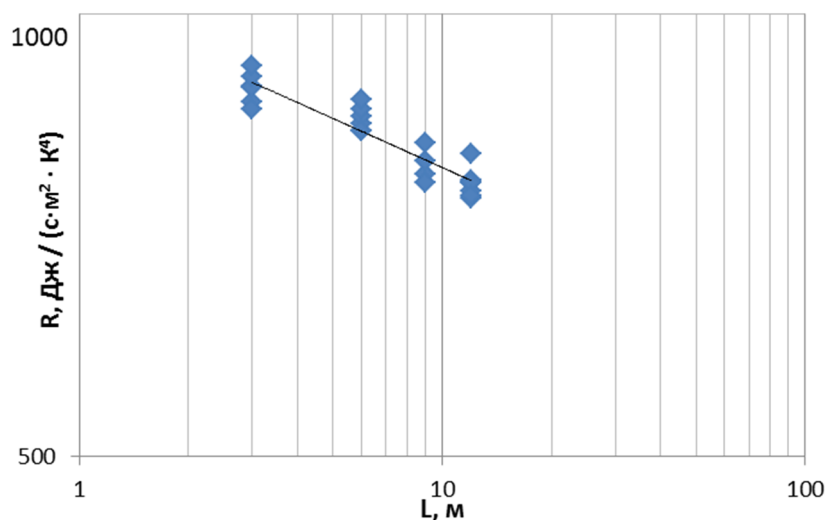


Рис. 3.15. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния съемки (L) при ракурсе 60°

Таким образом, как и при других ракурсах съемки, увеличение расстояния тепловизионной съемки с ракурсом 60° приводит к уменьшению энергетической светимости, фиксируемой тепловизором по степенному закону.

3.3 Влияние ракурса съемки на фиксируемую энергетическую светимость

Рассмотрим температурную съемку объекта тепловыделения с использованием экрана круг, расстояния съемки 9 м и ракурсах съемки – 90° , 30° , 45° , 60° (табл. 3.13). Длина волны излучения измеряемого объекта определяется в соответствии с законом смещения Вина:

$$\lambda = 2898/T, \quad (3.6)$$

где T – фиксируемая тепловизором температура, $^\circ\text{K}$.

Спектральный диапазон измерения используемого в лабораторных исследованиях тепловизора Land Cyclops Ti-814: 8-14 мкм. Коэффициент излучения объекта исследования (ϵ_t) – 0,98.

Табл. 3.13. Данные лабораторных исследований

Температура		Ракурс, $^\circ$	Дистанция, м	λ , мкм	S, площадь излучающей поверхности, м^2
$^\circ\text{C}$	К				
74,2	347,20	90	9	8,609	0,5
73,7	346,70	30		8,621	
73,6	346,60	45		8,624	
73,5	346,50	60		8,626	

Относительные значения плотности излучения $z_\lambda(x_\lambda)$, определяются таблично в зависимости от безразмерных координат длин волн $x_\lambda = \lambda/\lambda_m$ (табл. 3.14).

Табл. 3.14. Безразмерные координаты длин волн и относительные значения плотности излучения

Ракурс	90	30	45	60
$x_{\lambda 1}$	0,871	0,870	0,870	0,869
$x_{\lambda 2}$	1,626	1,624	1,623	1,623
$z_\lambda(x_{\lambda 1})$	0,1633	0,1631	0,1631	0,1602
$z_\lambda(x_{\lambda 2})$	0,5942	0,5942	0,5962	0,5858
$z_\lambda(x_{\lambda 2}) - z_\lambda(x_{\lambda 1})$	0,4309	0,4311	0,4331	0,4256

Определим плотность потока, излучаемого объектом тепловыделения в диапазоне длин волн от $\lambda_1=8$ мкм до $\lambda_2=14$ мкм (табл. 3.15).

Табл. 3.15. Расчет плотности потока излучения

Ракурс	R_0 , Вт/см ²	R_{8-14} , Вт/см ²
90	0,082	0,03357
30	0,082	0,03358
45	0,082	0,03374
60	0,082	0,03315

Плотность излучения абсолютно черного тела при заданной температуре (R_0) определяем по закону Стефана-Больцмана. Плотность потока, излучаемого в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 (R_{8-14} , Вт/см²) равна:

$$R_{8-14} = \epsilon_t \cdot R_0 \cdot [z_\lambda(x_{\lambda_2}) - z_\lambda(x_{\lambda_1})]. \quad (3.7)$$

Принимая, что поверхность объекта исследования подчиняется закону Ламберта, находим энергетическую яркость, соответствующую заданному спектральному диапазону (B , Вт/(см²·ср)).

$$B = R_{8-14} / \pi. \quad (3.8)$$

Задаваясь различными направлениями, характеризуемыми углом α относительно нормали к поверхности излучения, находим соответствующие проекции площади на плоскость, перпендикулярную данному направлению и энергетическую силу света по формуле 2.27 (табл. 3.16).

Табл. 3.16. Энергетическая сила света, полученная при использовании закона Ламберта и энергетическая сила света, полученная при использовании лабораторных данных

α	0	10	20	30	45	50	60	70	80
$S \cos(\alpha)$, м ²	0,500	0,493	0,470	0,433	0,354	0,321	0,250	0,171	0,087
$I(\alpha)_{\text{теоретическая}}$, Вт/ср	53,46	52,71	50,25	46,29	37,85	34,32	26,73	18,28	9,30
$I(\alpha)_{\text{экспериментальная}}$, Вт/ср				46,53	38,04		26,86		

Представим зависимость энергетической силы света, полученной из закона Ламберта и полученной при лабораторных исследованиях от косинуса угла тепловизионной съемки графически (рис. 3.16).

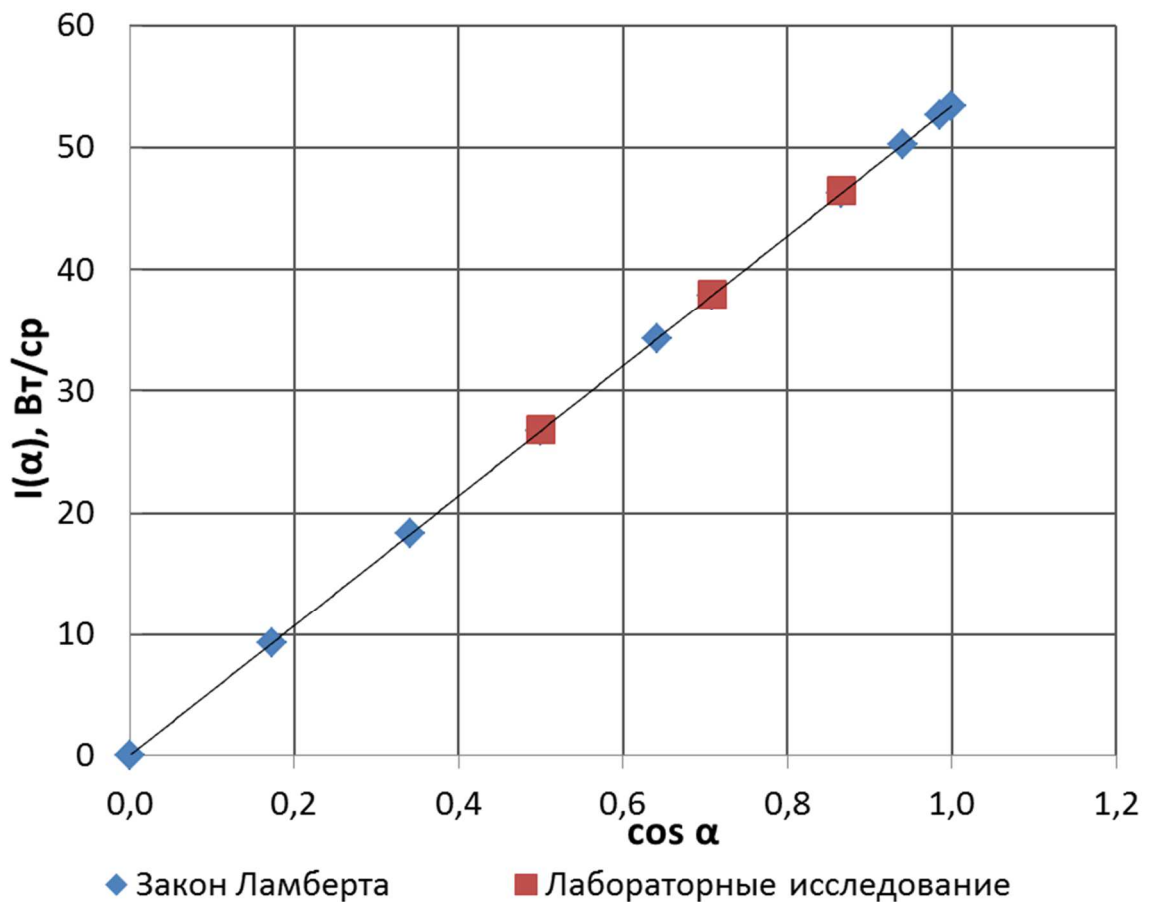


Рис. 3.16. Зависимость энергетической силы света от косинуса ракурса дистанционной тепловой съемки

Увеличение косинуса угла тепловизионной съемки приводит к увеличению энергетической силы света по зависимости с коэффициентом детерминации $R^2=1$:

$$I(\alpha) = 42,803\cos(\alpha) - 0,0082. \quad (3.9)$$

В ходе лабораторных исследований установлено, что влияние ракурса съемки на фиксируемую температуру полностью соответствует теоретическим предпосылкам [124, 125]. Энергетическая сила света, полученная при проведении лабораторных исследований, соответствует энергетической силе света, полученной из закона Ламберта (рис. 3.16).

3.4 Влияние скорости воздуха на динамику теплового состояния объекта исследования

Для определения влияния турбулентности на фиксируемую энергетическую светимость объекта тепловыделения были проведены специальные лабораторные исследования, которые проводились при использовании экрана щель вертикальная и ракурсе съемки 90^0 . Для создания потока воздуха использовался бытовой вентилятор. Эксперимент проводился с применением ручного чашечного анемометра МС-13 при скоростях потоков воздуха – 0,5 м/с, 1,4 м/с, 2,8 м/с.

При проведении лабораторных исследований установлено, что установка вентилятора справа, слева за нагревательным элементом приводит к незначительному изменению фиксируемой энергетической светимости (до 1%). Для дальнейшего анализа использовались данные, полученные при установке вентилятора справа от нагревательного элемента.

В результате проведения специальных лабораторных исследований были получены значения энергетической светимости в зависимости от скорости ветра и расстояния съемки (табл. 3.17).

Табл. 3.17. Результаты лабораторных исследований при изменении скорости воздуха

Расстояние, м	Энергетическая светимость R, Дж / (с·м ² · К ⁴)			
	Без турбулизации воздуха	Скорость, м/с		
		0,5	1,4	2,8
3	854	846	756	606
6	816	803	716	580
9	794	788	688	564
12	767	749	672	544
15	767	744	653	544
18	737	720	663	523
21	731	715	662	519
24	726	721	646	516
27	721	711	642	512

Графическое отображение зависимостей изменения энергетической светимости при изменении скорости ветра и увеличении расстояния тепловизионной съемки с ракурсом 90° представлено на рис. 3.17.

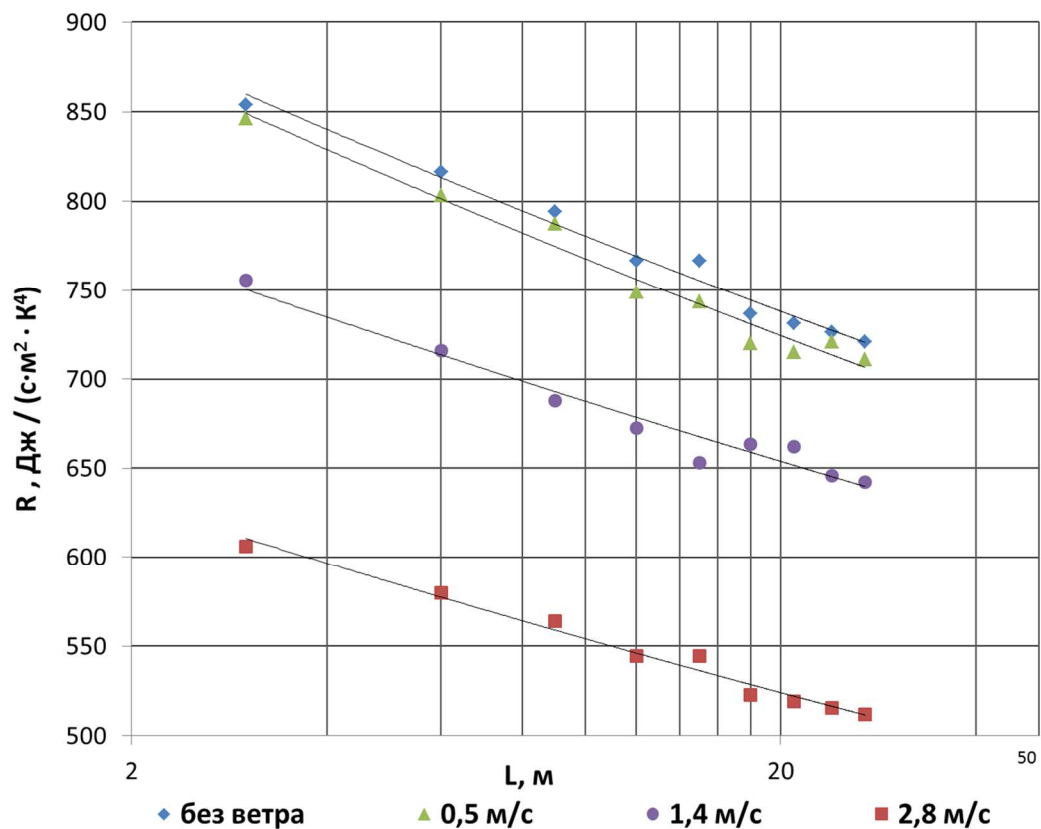


Рис. 3.17. Зависимость изменения энергетической светимости (R) от расстояния тепловизионной съемки (L) при различных скоростях воздуха.

Анализ результатов тепловизионной съемки показал, что увеличение скорости ветра приводит к значительному уменьшению фиксируемой энергетической светимости. При увеличении скорости потоков воздуха до 0,5 м/с энергетическая светимость уменьшилась до 4 %, при увеличении скорости до 1,4 м/с – энергетическая светимость уменьшилась на 20 %, при увеличении скорости до 2,8 м/с – фиксируемая энергетическая светимость уменьшилась на 29%.

Оценим ранее рассмотренные модели учета турбулентности – модель Копейки Н.С., модель Татарского В.И. и коэффициенты РД 153-34.0-20.364-00 (рис. 3.18).

Исходя из рисунка видно, что использование поправочных коэффициентов РД 153-34.0-20.364-00 позволяет получить наиболее точный результат, по сравнению с моделями Копейки Н.С. и Татарского В.И.

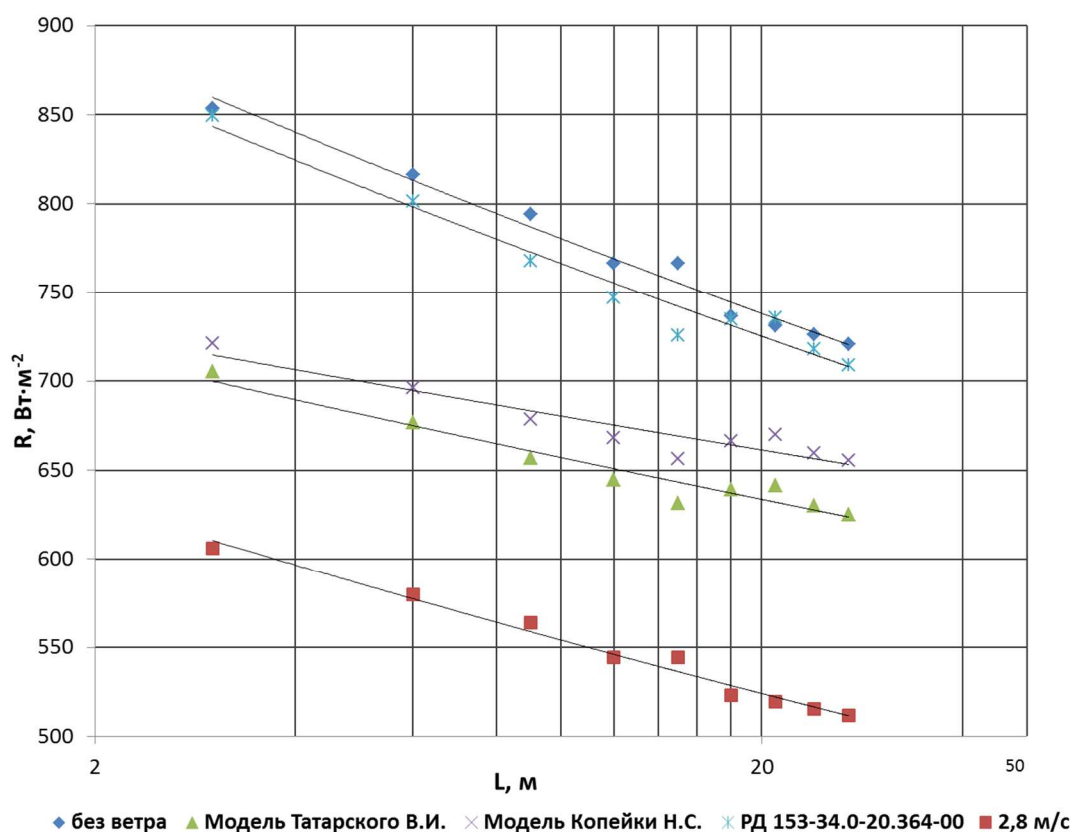


Рис. 3.18. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния съемки (L) при лабораторных исследованиях

Поправочные коэффициенты РД 153-34.0-20.364-00 позволяют более точно оценить влияние турбулентности воздуха до скорости ветра 8 м/с. Таким образом, для учета турбулентности атмосферы в практических дистанционных измерениях целесообразно использовать поправочные коэффициенты.

3.5 Влияние формы очага тепловыделения на фиксируемую энергетическую светимость

Одной из задач проведенных лабораторных исследований было выявление зависимости между меняющейся формой объекта тепловыделения и энергетической светимостью, фиксируемой тепловизором. Площадь формы объекта тепловыделения, согласно методике эксперимента, одинакова для всех трафаретов.

Для анализа влияния формы объекта тепловыделения используем энергетическую светимость, полученную при лабораторных исследованиях с ракурсом 90° и разными расстояниями съемки. Результаты исследований представлены графически (рис. 3.19), зависимости изменения фиксируемой энергетической светимости от расстояния съемки при разных экранах приведены в таблице 3.18.

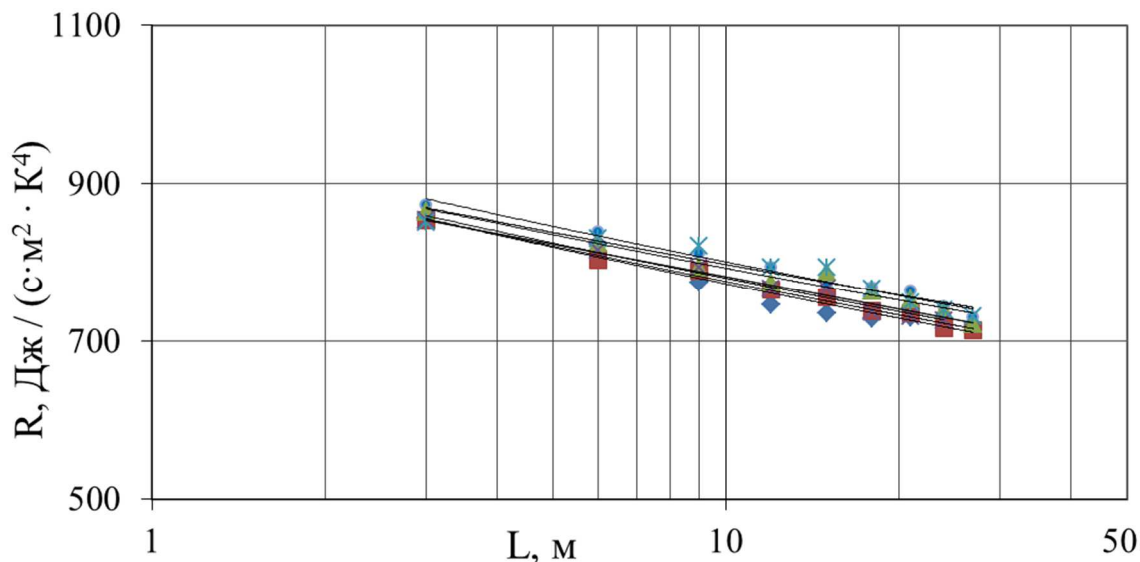


Рис. 3.19. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния съемки (L) при использовании разных экранов

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| ▲ - прямоугольник горизонтальный; | ■ - прямоугольник вертикальный; |
| ◆ - овал; | * - щель горизонтальная; |
| × - щель вертикальная; | ● - круг. |

Табл. 3.18. Уравнения зависимостей энергетической светимости от расстояния съемки для различных экранов

Экран	Уравнение	R^2
Круг	$R = 0,961 \cdot 10^3 L^{-0,079}$	$R^2 = 0,9778$
Овал	$R = 0,938 \cdot 10^3 L^{-0,084}$	$R^2 = 0,9506$
Прямоугольник вертикальный	$R = 1,040 \cdot 10^3 L^{-0,089}$	$R^2 = 0,9883$
Прямоугольник горизонтальный	$R = 0,943 \cdot 10^3 L^{-0,076}$	$R^2 = 0,9535$
Щель вертикальная	$R = 0,939 \cdot 10^3 x^{-0,081}$	$R^2 = 0,9777$
Щель горизонтальная	$R = 0,941 \cdot 10^3 x^{-0,072}$	$R^2 = 0,9073$

Анализ изменений энергетической светимости в зависимости от формы объекта тепловыделения при разных расстояниях съемки и ракурсе 90^0 показал, что разница в показаниях энергетической светимости между экранами – круг, овал, прямоугольник горизонтальный и щель вертикальная составляет менее 2 %. При использовании экранов прямоугольник вертикальный и щель горизонтальная показания температуры увеличиваются до 10 %.

Проведенный анализ лабораторных исследований свидетельствует, что использование экранов круг, овал, прямоугольник горизонтальный и щель вертикальная дает одинаковые значения температуры.

Изменение температуры до 10% при изменении формы объекта тепловыделения при дистанционном тепловом контроле не будет оказывать значительного воздействия на результаты контроля. Таким образом, существенного влияния на энергетическую светимость, фиксируемую тепловизором, форма очага самовозгорания не оказывает [126].

3.6 Влияние поглощения атмосферой излучения объекта исследования на фиксируемую энергетическую светимость

Рассчитаем коэффициент пропускания атмосферы для условий температурной съемки объекта тепловыделения с использованием экрана овал, ракурсом 90^0 и разными расстояниями съемки (табл. 3.19).

Метеорологическая дальность видимости составляла $D_v = 20$ км. Длина волны излучения измеряемого объекта определяется в соответствии с законом смещения Вина $\lambda = 2898/T$, мкм.

Толщина слоя осажденной воды при относительной влажности 100 % определяется по известным соотношениям. Относительная влажность при лабораторных исследованиях составляла 62%. Толщина слоя осажденной воды при относительной влажности 62 % и разных расстояниях съемки определяется перемножением значения толщины слоя осажденной воды при относительной влажности 100 % на показания влажности и расстояния съемки (мм/км).

Коэффициент рассеивания в видимой области спектра и коэффициент рассеяния на не рассчитывались, т.к. измерения проводились в помещении.

Коэффициенты пропускания, определяемые молекулярным поглощением парами воды и молекулярным поглощением углекислого газа, определяем по таблицам Пассмана-Лармора.

Расчетные значения полного коэффициента пропускания атмосферы, который учитывает рассеивание при молекулярном поглощении H_2O и молекулярном поглощении CO_2 составляют 0,99 – 1,00.

Таким образом, воздействием поглощения излучения газами атмосферы на фиксируемую энергетическую светимость можно пренебречь. Дистанционный контроль теплового состояния породных отвалов необходимо проводить в утреннее или вечернее время в метеорологических условиях, характеризующихся отсутствием осадков. Однако при съемке горящих породных отвалов необходимые метеорологические условия порой сложно соблюсти. Поэтому, при определении теплового состояния породных отвалов в сложных метеорологических условиях, фиксируемая энергетическая светимость должна корректироваться с использованием коэффициента аэрозольного ослабления (формула 2.7).

Табл. 3.19. Результаты расчет коэффициента пропускания атмосферы

Дистанция, км	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024	0,027
влажность	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
температура, С	77,6	74,2	69,0	65,7	64,5	63,8	63,9	63,7	62,5
температура, К	350,6	347,2	342,0	338,7	337,5	336,8	336,9	336,7	335,5
Метеорологическая дальность видимости, D_V	20	20	20	20	20	20	20	20	20
<u>Длина волны</u> исходя из закона смещения Вина $\lambda = 2898/T$, мкм	8,3	8,3	8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
<u>Толщина слоя осажденной воды</u> при относительной влажности 100 %								0	0,027
при влажности 0,62, мм/км	266	235	194	171	163	158	159	158	150
Для дистанции, мм/км	200	176	146	128	122	119	119	119	113
	0,60	1,06	1,31	1,54	1,83	2,14	2,50	2,86	3,05
Коэффициент рассеивания в видимой области спектра $\gamma_{\lambda 0} = 3,92/D_V$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
коэффициент рассеяния на длине волны λ $\gamma_{\lambda} = \gamma_{\lambda 0}/(0,6/\lambda)^{-1,3}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<u>Коэффициент пропускания, F_P</u> $F_P = e^{-\gamma D}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент пропускания водяным паром, F_{H_2O}	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Коэффициент пропускания CO ₂ , F_{CO_2}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Полный коэффициент пропускания, $F = F_P * F_{H_2O} * F_{CO_2}$	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00

3.7 Анализ влияния расстояния дистанционного контроля температуры на температурный контраст между объектом тепловыделения и тепловизором

Анализ результатов данных лабораторных исследований проведен при помощи величины температурного контраста между объектом тепловыделения и тепловизором (формула 2.46).

Параметры основных теплофизических величин для расчета при лабораторном исследовании представлены в таблице 3.20.

Табл. 3.20. Параметры основных теплофизических величин при лабораторном исследовании

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Температура объекта тепловыделения	T, К	125
Коэффициент теплоотдачи объекта тепловыделения	α_o (Дж/м ² *К*с)	1097
Коэффициент теплопроводности объекта тепловыделения	λ_o (Дж/м*К*с)	92
Коэффициент теплопроводности атмосферы	λ_a (Дж/м*К*с)	0,0259

Температурный контраст между очагом тепловыделения и тепловизором (ΔT), определенный при лабораторных исследованиях с увеличением расстояния (L, м) дистанционной температурной съемки уменьшается по степенной зависимости с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,99$ (рис. 3.20) и определяется по формуле:

$$\Delta T = 2,154L^{-1,81} \quad (3.10)$$

Оценим статистическую значимость коэффициентов регрессии ($a=2,154$, $b=-1,81$) с помощью t-критерия Стьюдента.

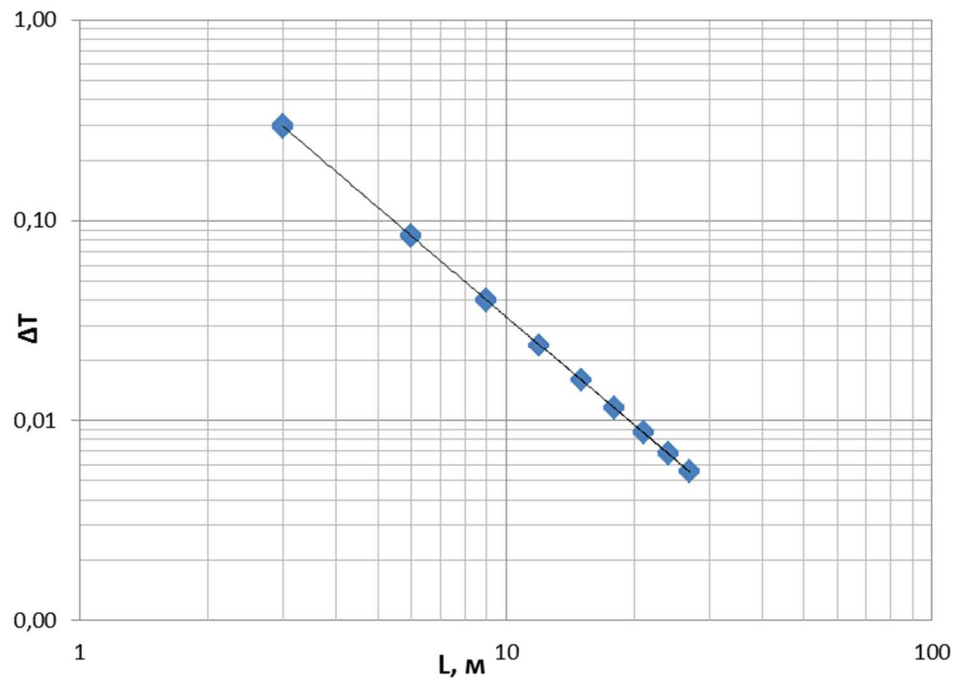


Рис. 3.20. Зависимость изменения температурного контраста (ΔT) тепловизионной съемки от расстояния съемки (L)

Если фактическое значение t -критерия больше табличного, то основную гипотезу отвергают и считают, что с вероятностью 0,95 параметр или статистическая характеристика в генеральной совокупности значимо отличается от нуля. Если фактическое значение t -критерия меньше табличного, то параметр или статистическая характеристика в генеральной совокупности незначимо отличается от нуля при уровне значимости 0,95.

Проведем анализ точности определения оценок коэффициентов регрессии - несмещенную оценку дисперсии возмущений (S^2) и стандартное отклонение коэффициентов a и b (S_a, S_b) (табл. 3.21).

Табличное значение критерия Стьюдента равно: $t_t (n-m-1; \alpha) = (113; 0.05) = 1,98$. Фактические значения критериев Стьюдента равны: $t_b = \frac{b}{S_b} = 5122$; $t_a = \frac{a}{S_a} = 87$.

Так как $t_a > t_{\text{крит}}$ и $t_b > t_{\text{крит}}$ Статистическая значимость коэффициентов регрессии a и b подтверждается.

Табл. 3.21. Данные анализа точности определения оценок коэффициентов регрессии

Параметр	Значение
$S^2 = \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{n - m - 1}$	0,0022
$S_a = S \frac{\sqrt{\sum x^2}}{n S(x)}$	0,0246
$S_b = \frac{S}{\sqrt{n} S(x)}$	0,00035

Оценка статистической значимости парной линейной регрессии производится по критерию Фишера.

$$\text{Фактическое значение F-критерия: } F = \frac{R^2 (n - m - 1)}{1 - R^2 m} = 11187.$$

Табличное значение критерия со степенями свободы $k_1=1$ и $k_2=115$, $F_{\text{табл}} = 139$. Поскольку фактическое значение $F > F_{\text{табл}}$, то коэффициент детерминации статистически значим (найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна).

Таким образом, при выполнении лабораторных исследований установлено, что температурный контраст обратно пропорционален расстоянию в степени 1,8.

3.8 Выводы

1. Разработана методика исследований теплового состояния объекта тепловыделения в лабораторных условиях.

2. Лабораторными исследованиями установлено, что форма очага нагревания не оказывает влияния на фиксируемую энергетическую светимость. Использование различных экранов (круг, овал, прямоугольник горизонтальный и щель вертикальная) дает одинаковые значения энергетической светимости.

3. Показано, что увеличение расстояния тепловизионной съемки породных отвалов приводит к уменьшению энергетической светимости независимо от выбранного ракурса съемки.

4. Лабораторными исследованиями подтверждено, что энергетическая светимость пропорциональна ракурсу дистанционной температурной съемки.

5. Исследованиями в лабораторных условиях установлено, что при увеличении скорости ветра фиксируемая энергетическая светимость уменьшается. Показано, что для оценки влияния турбулентности атмосферы необходимо использовать поправочные коэффициенты РД 153-34.0-20.364-00.

6. Лабораторными исследованиями показано, что рассеивание излучения при молекулярном поглощении H_2O и молекулярном поглощении CO_2 не оказывает влияния на фиксируемую энергетическую светимость.

7. Исследованиями отмечено, что температурный контраст обратно пропорционален расстоянию дистанционного контроля температуры в степени 1,8.

РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПОРОДНЫХ ОТВАЛАХ ШАХТ ДОНБАССА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ

4.1 Методика проведения натурных исследований

Для проверки в натурных условиях, выявленных при лабораторных исследованиях зависимостей влияния расстояния и ракурса дистанционного контроля температуры на энергетическую светимость объекта тепловыделения и температурный контраст между очагом самовозгорания и тепловизором, были проведены натурные исследования. Исследования теплового состояния ПО были проведены с помощью тепловизора Fluke Ti-125 на ПО шахт Донбасса: им. М. И. Калинина, Октябрьский рудник, им. В.И. Ленина, им. С. М. Кирова и 13-бис [127, 128, 129, 130].

Исследования проводились в соответствии с разработанной в настоящей работе методикой, которая учитывала теоретические основы определения теплового состояния ПО с помощью дистанционных методов и зависимостей, полученных при лабораторных исследованиях.

В ходе проведения исследований использовались следующая аппаратура и материалы: тепловизор Fluke Ti-125, контактный измеритель температуры, аспирационный психрометр, ручной чашечный анемометр по ГОСТ 6376-74, измерительная металлическая рулетка по ГОСТ 7502-80, барометр, термопреобразователь. Относительная погрешность измерения энергетической светимости тепловизором Fluke Ti-125 - 2% (паспортные данные).

В соответствии с ГОСТ 26629-85 место установки тепловизора выбиралось таким образом, чтобы поверхность объекта измерений находилась в прямой видимости под углом наблюдения не менее 60°.

Минимально допустимое приближение оператора тепловизора к обследуемой поверхности составляло 1 м (ГОСТ 26629-85) [131].

Первым этапом подготовки к тепловизионной съемке ПО является определение коэффициента излучения и отраженной кажущейся температуры.

Коэффициент излучения определяется практическим путем, посредством измерения с использованием контактного термометра. Этот метод состоит в следующем [118, 132]:

1) первоначально измеряют температуру поверхности обследуемого участка породного отвала посредством контактного термометра;

2) устанавливают тепловизор на расстоянии от обследуемого участка породного отвала, при котором будет проводиться обследование;

3) определяют отраженную кажущуюся температуру обследуемого участка породного отвала и вводят её в тепловизор для последующей корректировки результатов измерений;

4) наводят тепловизор на участок породного отвала, осуществляют фокусировку изображения, получают инфракрасное изображение обследуемого участка породного отвала и фиксируют его;

5) не перемещая тепловизор, регулируют значение коэффициента излучения до тех пор, пока ее значение не будет соответствовать значению, полученному при контактном измерении;

6) с целью повышения точности повторяют этапы от 1) до 5) не менее трех раз, после чего усредняют полученные значения;

7) полученное усредненное значение будет соответствовать коэффициенту излучения поверхности обследуемого участка породного отвала, вводят его в тепловизор.

Определение отраженной кажущейся температуры проводится методом отражателя (рис. 4.1). Данный метод состоит в следующем:

1) регулировками тепловизора устанавливают значение коэффициента излучения на 1,00;

2) устанавливают тепловизор на расстоянии от участка ПО, при котором будет проводиться обследование, наводят тепловизор на исследуемый объект, осуществляют фокусировку изображения;

3) устанавливают рефлектор в поле зрения тепловизора непосредственно перед обследуемым участком породного отвала таким образом, чтобы плоскость

отражения рефлектора была параллельна поверхности объекта (рис. 4.1). В качестве рефлектора возможно использование смятой и далее расправленной алюминиевой фольги. Фольга имеет высокий коэффициент отражения и, благодаря скомканной структуре, рассеянное отражение излучения практически идеальное;

4) не перемещая тепловизор, измеряют с его помощью кажущуюся температуру рефлектора и регистрируют результат измерения. Полученное значение будет представлять собой отраженную кажущуюся температуру обследуемого участка породного отвала;

5) с целью повышения точности повторяют этапы от 2) до 4) не менее трех раз, после чего усредняют полученные значения;

6) вводят усредненное значение кажущейся температуры в тепловизор для последующей коррекции результатов измерений температуры поверхности обследуемого участка породного отвала.

Температурную съемку необходимо проводить в условиях повышенной облачности, которая создает оптимальные условия для проведения излучения ($0,85 < \varepsilon < 0,96$). Инфракрасное излучение, исходящее от безоблачного неба, в значительной степени влияет на поверхностную температуру – в некоторых случаях температура держится на протяжении нескольких часов после того как объект был подвержен солнечному воздействию.



1 – тепловизор; 2 - отраженное излучение сторонних предметов; 3 – рефлектор; 4 – обследуемый объект.

Рис. 4.1. Схема проведения исследований по методу отражателя

Проведение измерений

1. Тепловизионная съемка породного отвала проводится с хвостовой, лобной и торцевых сторон. При этом плоский ПО правильной формы и хребтовидный отвал снимают с четырех сторон, а произвольной формы - из четырех точек, ориентированных на стороны света. В случае больших размеров породного отвала или наличия посторонних объектов, мешающих съемке, отвал снимают по частям.

2. Дополнительно на ПО осматривают горизонтальные площадки, которые не попали в объектив тепловизора. На таких площадках, также необходимо проводить тепловизионную съемку (рисунок 4.2).

3. С применением тепловизионной съемки проводится выявление очагов самовозгорания на ранней стадии горения.

3.1. В случае необходимости проводят выбор отдельных участков ПО для проведения съемки.

3.2. Учитывая размеры ПО и характеристики используемого тепловизора, определяют максимальное расстояние выявления очага самонагревания (формула 2.27). При определении максимального расстояния необходимо учесть то, что часть ПО должна занимать не менее 60% тепловизионного снимка

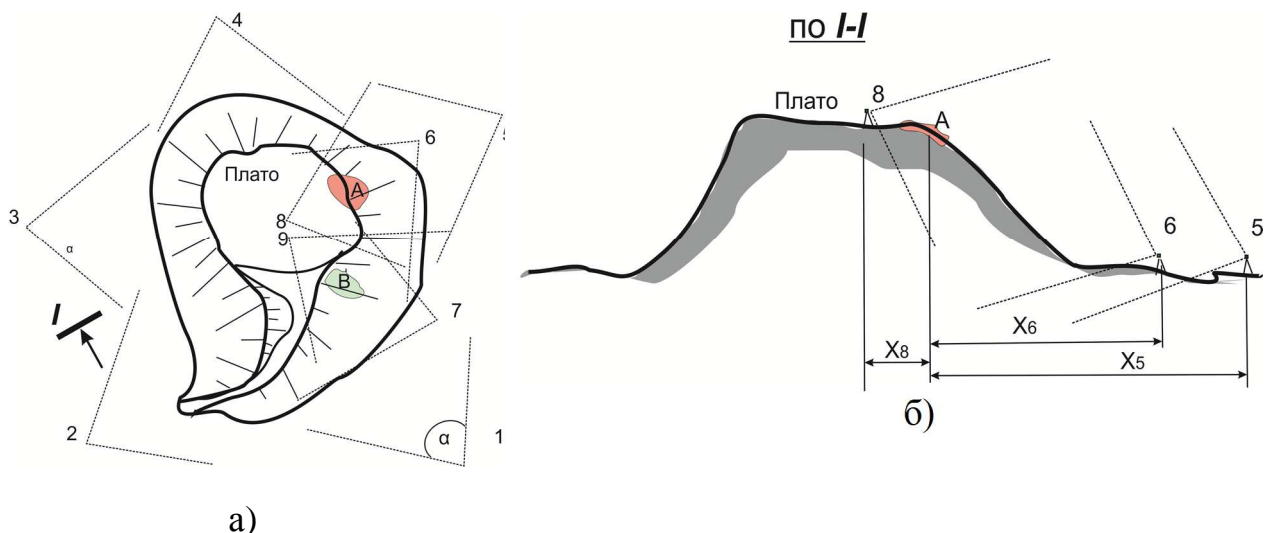


Рис. 4.2. План (а) и сечение (б) съемки поверхности ПО: 1-8 - точки съемки и угол (α) обзора тепловизора; А, В - источники горения и самонагревания на поверхности отвальной массы; X5, X6, X8 - расстояние от источника горения к точке съемки (тепловизору)

3.3. При тепловизионной съемке необходимо учитывать ландшафт местности. При этом в объектив тепловизора не должны попадать посторонние объекты (деревья, кустарники).

3.4. При обнаружении скрытых очагов тепловыделения используется принцип сравнения текущей зоны контроля с эталонной (не имеющей очагов тепловыделения) зоной. Эталонная зона выбирается аналогично контролируемой и находится в тех же условиях теплообмена (располагается вблизи исследуемой зоны). Оценка тепловых аномалий производится как по температурному перепаду в зоне аномалии, так и путем сравнения с эталонной зоной.

3.6. Часть породного отвала, температура поверхности которого превышает температуру эталонной зоны на 5°C , считается очагом самовозгорания. Очагами самонагревания также считаются части породного отвала, температура поверхности которых выше 45°C .

4. Съемку обнаруженного очага самовозгорания проводят с уменьшением (увеличением) дистанции тепловизионной съемки. Уменьшение (увеличение) дистанции проводится при одновременной фиксации в объективе тепловизора обнаруженной аномалии и эталонной зоны.

5. Тепловизор устанавливают на расстоянии от участка поверхности породного отвала, на котором будет проводиться обследование, наводят тепловизор на обследуемый участок ПО, осуществляют фокусировку изображения. Проводят тепловизионную съемку. Тепловизионная съемка обнаруженного очага самонагревания проводится с изменением дистанции съемки. При изменении дистанции с выбранным шагом температурная съемка повторяется. Показатели фиксируются.

6. Натурные исследования проводятся при ракурсах съемки 30° , 60° , 0° и 45° относительно перпендикуляра к обнаруженному очагу самонагревания. При каждом ракурсе, проводится тепловизионная съемка с увеличением дистанции. Показатели фиксируются.

7. На выявленном очаге самонагревания проводят дополнительные измерения - при помощи термометра измеряют температуру окружающего

воздуха; при помощи ручного чашечного анемометра, в соответствии с методикой его использования, выполняют замер скорости ветра. Показания фиксируют; проводят контактную температурную съемку на глубине 0,1 м.

8. Фиксируемую энергетическую светимость корректируют в зависимости от скорости ветра в соответствии с РД 153-34.0-20.364-00.

9. Очаги самовозгорания наносят на план ПО.

10. Тепловизионную съемку проводят с ракурсом не превышающим 60° . При невозможности провести съемку очага самовозгорания с заданным ракурсом, фиксируемую энергетическую светимость корректируют в соответствии с законом Ламберта.

11. Форма части стороны породного отвала или очага самонагревания не учитывается.

4.2 Натурные исследования температурного состояния ПО

Натурные исследования проводились на действующем ГПО шахты «Октябрьский рудник». Отвал имеет высоту 58 м и площадь основания 223 м^2 . Породный отвал имеет форму усеченного конуса. Угол откоса 33° . На момент проведения тепловизионной съемки породный отвал состоял из двух ярусов. Порода на отвал доставляется автотранспортом, выгружается, образуя плотно прилегающие друг к другу конусы.

Согласно разработанной в настоящей работе методике натурных исследований были проведены подготовительные измерения, учтены размеры ПО, характеристики используемого тепловизора. Коэффициент излучения составлял 0,95. Температура воздуха составляла 2°C , а скорость ветра - 8 м/с. Ввиду значительных размеров ПО тепловизионная съемка проходила по частям света. Так как ПО имеет форму усеченного конуса, то вершина при съемке панорамы породного отвала осталась недоступной. На вершине была проведена дополнительная съемка. Результаты натурных исследований температурного состояния ПО шахты «Октябрьский рудник» приведены в Приложении В. При

проведении натурных исследований поверхности породного отвала шахты «Октябрьский рудник» были выявлены очаги самовозгорания (рис. 4.3).

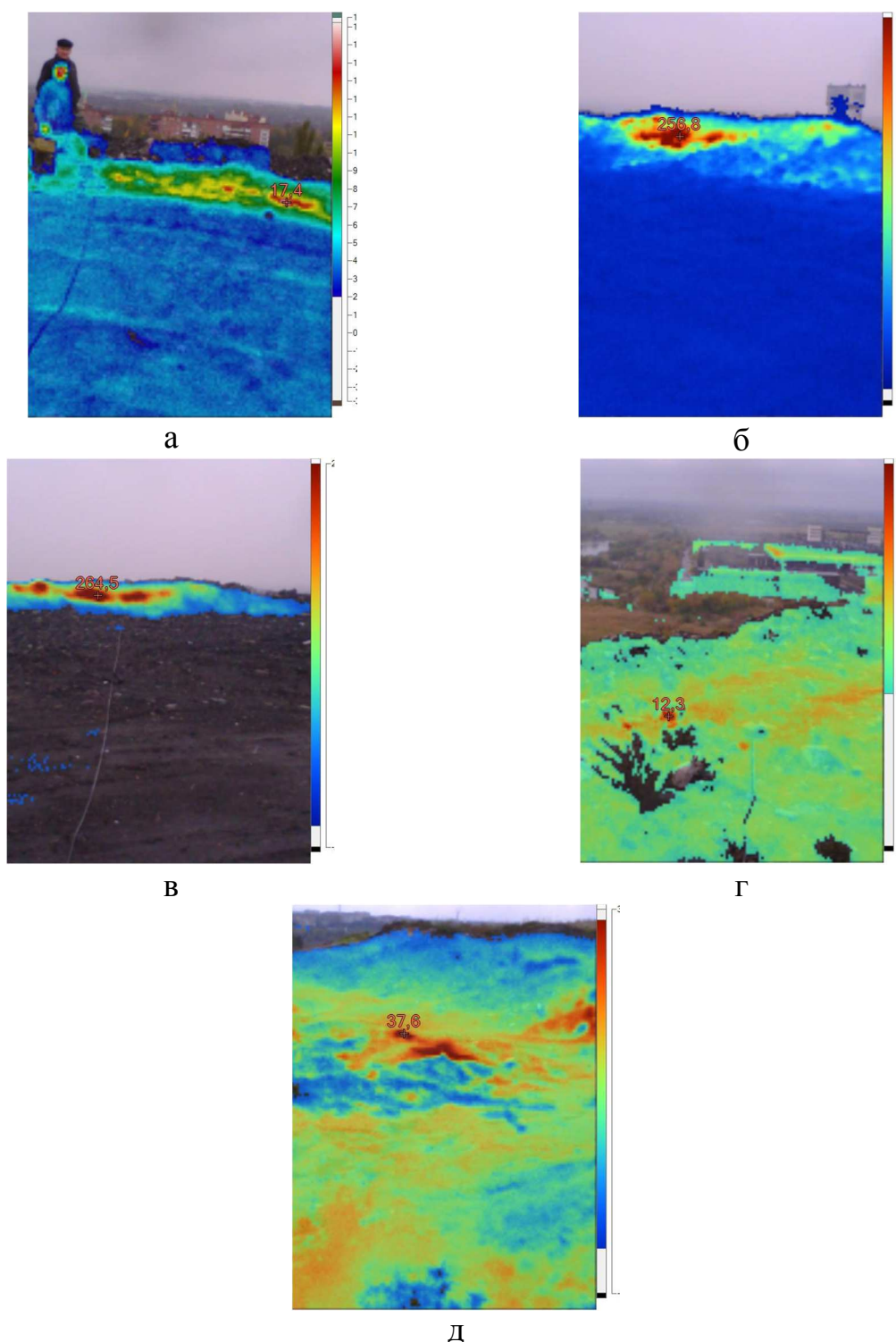


Рис. 4.3. Тепловизионные фотографии съемки ПО шахты «Октябрьский рудник»: а, б, в, г, д - очаги самонагревания А1, А2, А3, А4, А5. соответственно.

Для оценки влияния расстояния и ракурса тепловизионной съемки на энергетическую светимость очагов самовозгорания проводилась дополнительная тепловизионная съемка с увеличением дистанции и изменением ракурса съемки.

Энергетическая светимость, полученная в результате натурных исследований на ПО шахты «Октябрьский рудник», была обработана с расчетом статистических показателей и с проверкой на однородность и достоверность (табл. 4.1).

Табл. 4.1. Результаты проверки данных натурных исследований на отвале шахты «Октябрьский рудник»

Очаг самонагревания	Однородность выборки		Достоверность выборки						
	Критерий Стьюдента		Коэф. вариации	Правило трех сигм				Критерий χ^2 Пирсона	
	t _ф	t _т		А	Е	3σ _а	3σ _е	$\chi^2_{\text{ф}}$	$\chi^2_{\text{т}}$
A1	1,85	2,23	2	0,571	0,337	2,216	4,431	7,55	7,81
A2	0,86	4,30	23	-1	-	-4,423	8,485	-	-
A3	1,72	2,78	31	-0,269	-2,559	3,286	6,573	3,65	3,84
A4	1,66	2,31	5	0,604	-0,959	2,449	4,889	5,82	5,99
A5	1,92	2,16	11	0,694	-0,228	1,964	3,928	7,61	7,81

Проверка на однородность с помощью критерия Стьюдента показала, что данные натурных исследований породного отвала шахты «Октябрьский рудник» являются однородными, т.к. расчетное значение критерия Стьюдента ($t_{\text{ф}}$) меньше теоретического ($t_{\text{т}}$).

Расчет асимметрии и эксцесса показал, что энергетическая светимость, определенная при натурных исследованиях породного отвала шахты «Октябрьский рудник» достоверна. Коэффициент вариации составил менее 33%, что соответствует распределению генеральной совокупности по нормальному закону. Гипотеза о соответствии генеральной совокупности нормальному закону распределения подтверждается, т.к. при 5% уровне значимости и степени свободы $5-3=2$ теоретическое значение $\chi^2_{\text{т}}$ меньше фактического значения χ^2 Пирсона.

При увеличении расстояния тепловизионной съемки (L , м), энергетическая светимость (R , Дж / (с·м² · К⁴)) уменьшается по степенной зависимости (рис. 4.4., табл. 4.2).

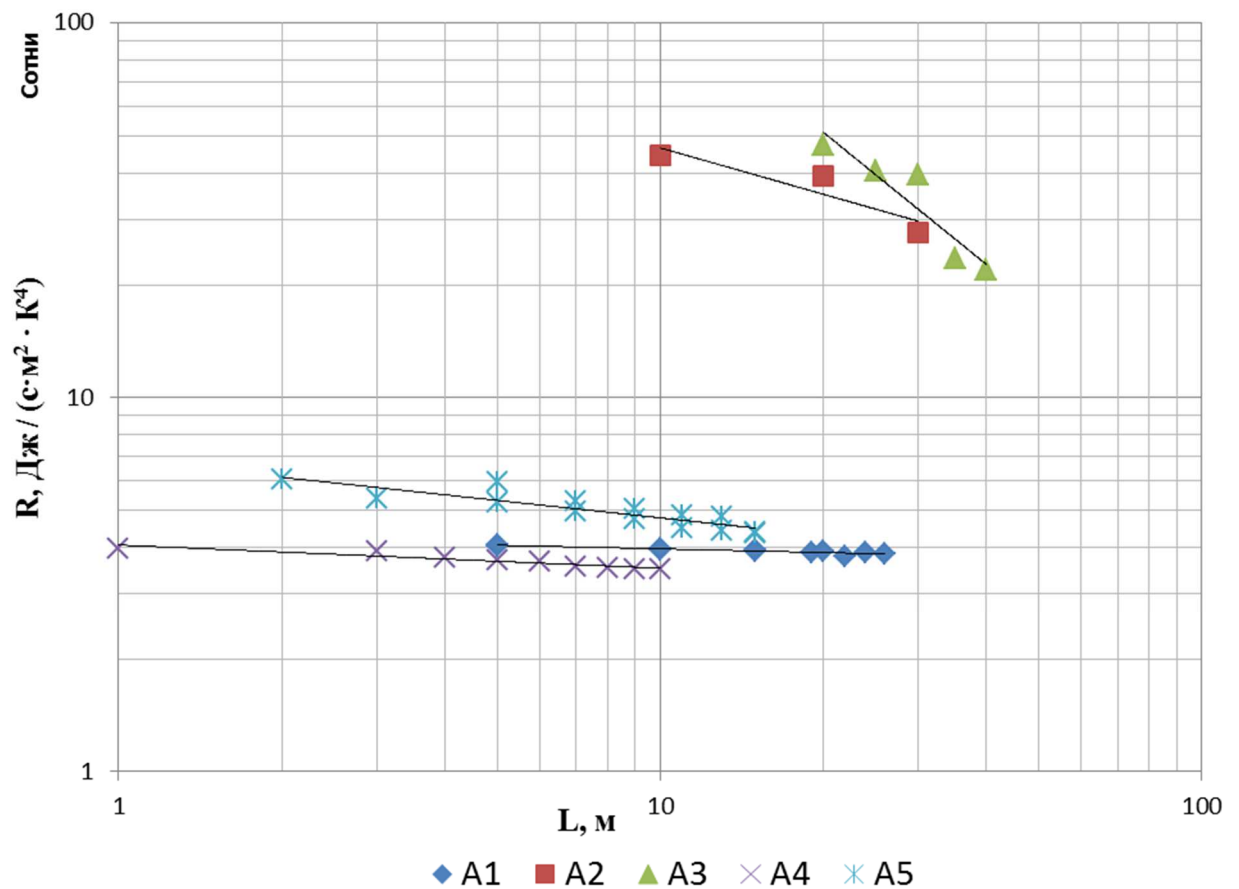


Рис. 4.4. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния (L) при съемке породного отвала шахты «Октябрьский рудник»

Табл. 4.2. Зависимости энергетической светимости от расстояния съемки породного отвала шахты «Октябрьский рудник»

Очаг самонагреваний	Уравнение	Коэффициент детерминации
A1	$R = 425,91L^{-0,033}$	$R^2 = 0,8692$
A2	$R = 11947L^{-0,409}$	$R^2 = 0,8406$
A3	$R = 169254L^{-1,167}$	$R^2 = 0,8608$
A4	$R = 404,31L^{-0,062}$	$R^2 = 0,8817$
A5	$R = 682,51L^{-0,155}$	$R^2 = 0,7928$

Энергетическая светимость очагов самонагрева A_2 и A_3 , имеющих температуру 380°C и 390°C соответственно, с увеличением расстояния съемки уменьшается резче чем энергетическая светимость низкотемпературных очагов самонагрева (A_1 , A_2 , A_4 , A_5).

Энергетическая сила света очага самонагрева A_5 с ракурсом 60° полностью соответствует теоретическим предпосылкам о влиянии ракурса съемки на энергетическую светимость при дистанционном методе контроля температуры (рис. 4.5).

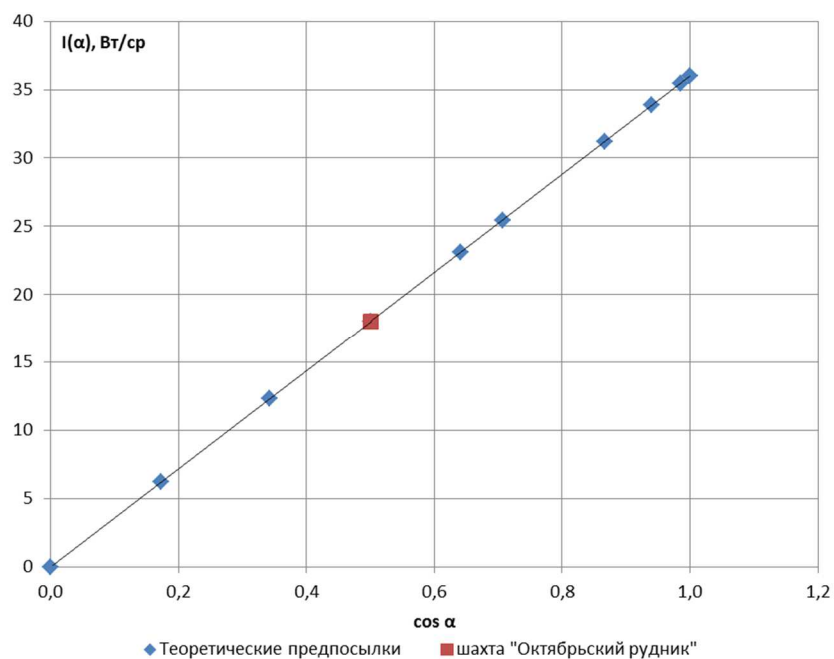


Рис. 4.5. Зависимость энергетической силы света ($I(\alpha)$) при дистанционной тепловой съемке шахты «Октябрьский рудник» от ракурса тепловизионной съемки

Исследования также проводились на действующем ГПО шахты имени М. И. Калинина, который имеет высоту 82 м и площадь основания 213188 м^2 . Отвал плоский, эксплуатируется с 1962 года. По откосу ограждающей призмы с наружной стороны отсыпается и формируется изолирующий слой из инертного материала толщиной 0,8 м.

Коэффициент излучения составлял 0,95. Температура воздуха составляла 2°C , а скорость ветра - 8 м/с.

При проведении натурных исследований поверхности породного отвала шахты им. М. И. Калинина были выявлены очаги самонагрева, незафиксированные контактной температурной съемкой (рис. 4.6). Результаты натурных исследований на ПО шахты им. М. И. Калинина приведены в Приложении В.

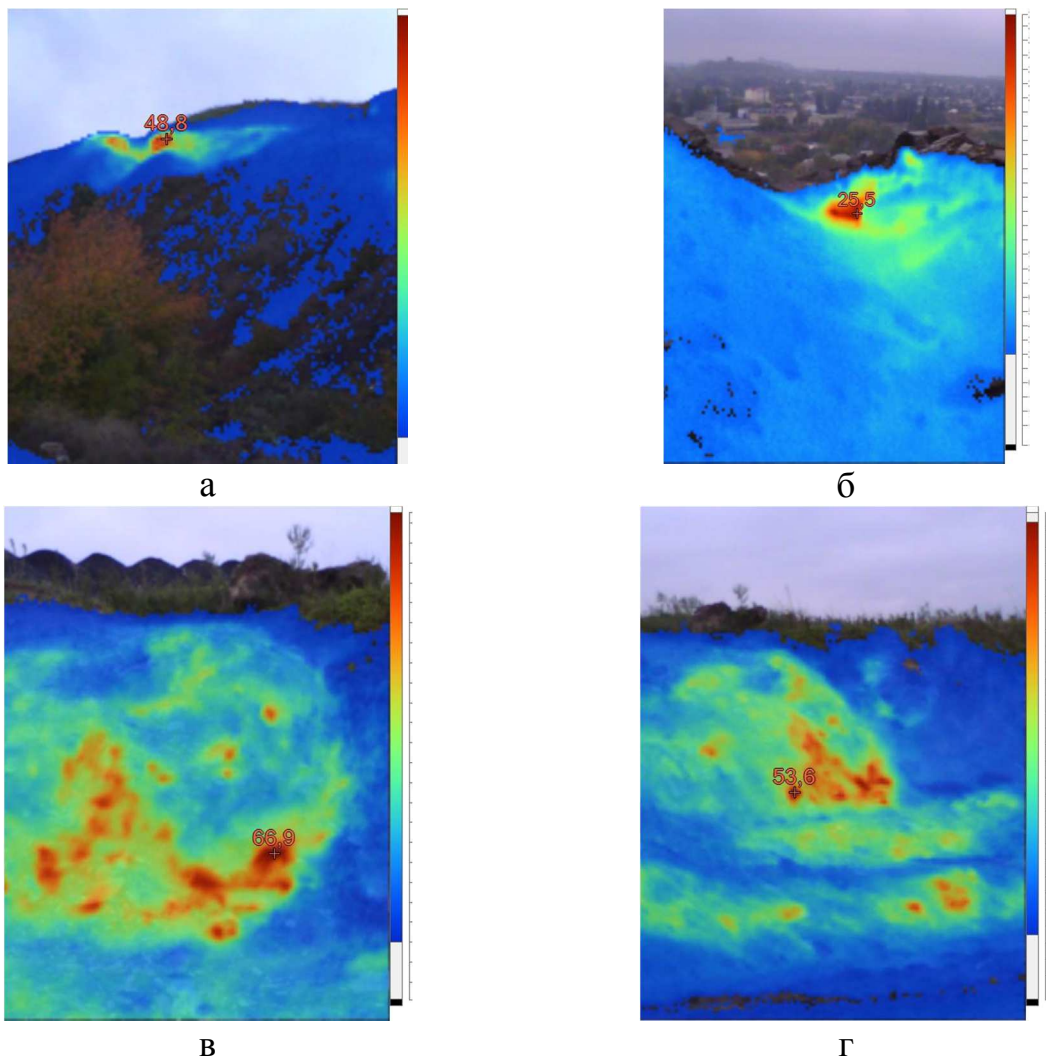


Рис. 4.6. Тепловизионные фотографии породного отвала шахты им. М.И. Калинина: а – очаг самонагрева Б1; б – очаг самонагрева Б2; в – очаг самонагрева Б3 (ракурс 90°); г – очаг самонагрева Б3 (ракурс 45°).

Энергетическая светимость, полученная в результате натурных исследований на ПО шахты им. М.И. Калинина, была обработана с расчетом

статистических показателей и проверкой на однородность и достоверность (табл. 4.3). Проверка на однородность с помощью критерия Стьюдента показала, что данные натурных исследований породного отвала шахты им. М.И. Калинина являются однородными ($t_{\phi} < t_{\tau}$). Расчет асимметрии и эксцесса показал, что энергетическая светимость, определенная при натурных исследованиях породного отвала шахты им. М.И. Калинина достоверна. Коэффициент вариации составил менее 33%, что соответствует распределению генеральной совокупности по нормальному закону. Гипотеза о соответствии генеральной совокупности нормальному закону распределения подтверждается, т.к. теоретическое значение χ^2_{τ} меньше фактического значения χ^2 Пирсона.

Табл. 4.3. Результаты проверки данных исследований на отвале шахты им. М.И. Калинина

Очаг самонагревания	Однородность выборки		Достоверность выборки						
	Критерий Стьюдента		Коэф. вариации	Правило трех сигм				Критерий χ^2 Пирсона	
	t_{ϕ}	t_{τ}		$K_{\text{вар.}}$	A	E	$3\sigma_a$	$3\sigma_e$	
Б1	1,37	2,78	4	0,565	-1,548	3,286	6,573	9,28	9,49
Б2	1,6	2,36	9	0,691	-1,005	2,598	5,196	9,42	9,49
Б3	1,62	2,2	7	-0,123	-0,603	2,121	4,243	9,36	9,49

При увеличении расстояния натурных исследований (L, м), энергетическая светимость (R, Дж / (с·м² · К⁴)) уменьшается по степенной зависимости (рис. 4.7., табл. 4.4).

Табл. 4.4. Зависимости энергетической светимости от расстояния съемки породного отвала шахты «Октябрьский рудник»

Очаги самонагревания	Уравнение	Коэффициент детерминации
Б1	$R = 696,47L^{-0,07}$	$R^2 = 0,9706$
Б2	$R = 517,52 L^{-0,102}$	$R^2 = 0,9843$
Б3	$R = 754,85 L^{-0,065}$	$R^2 = 0,9236$

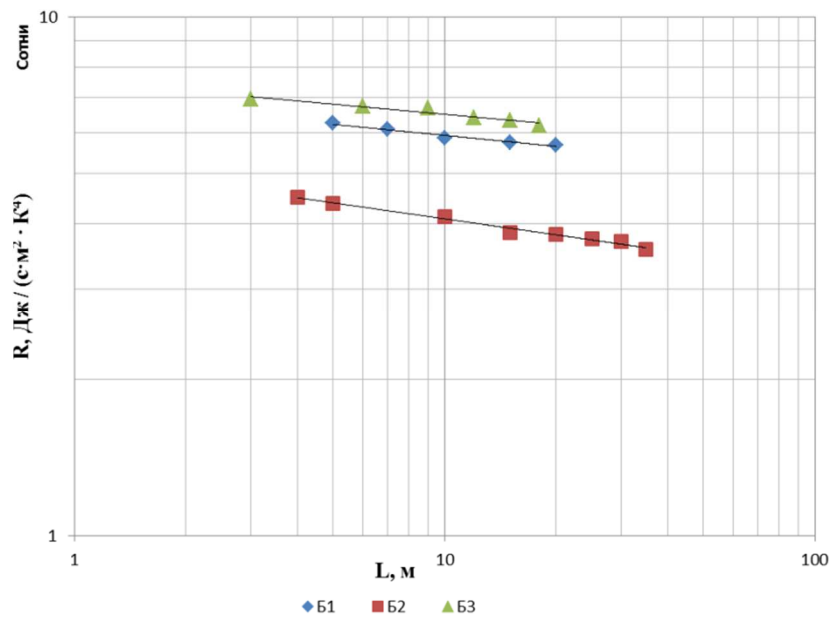


Рис. 4.7. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния (L) при съемке породного отвала шахты им. М.И. Калинина

Энергетическая сила света очага самонагревания Б3 с ракурсом 45° полностью соответствует закону Ламберта (рис. 4.7).

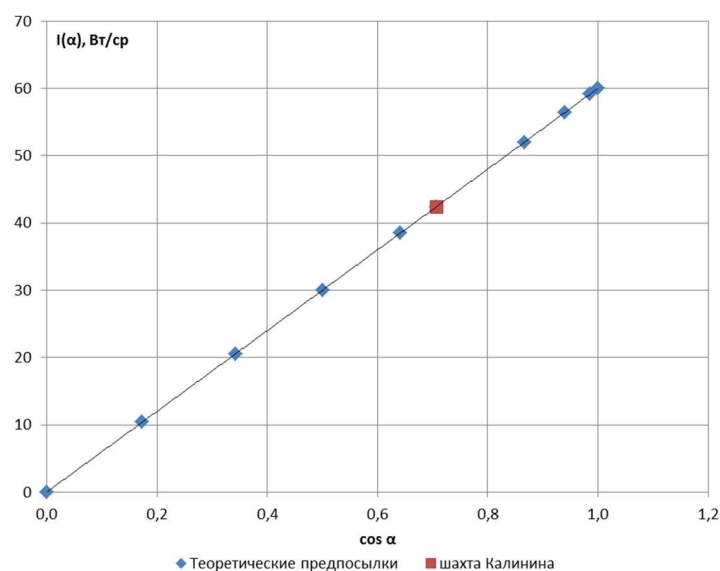


Рис. 4.7. Зависимость энергетической силы света ($I(\alpha)$) при дистанционной тепловой съемке шахты им. М.И. Калинина от ракурса тепловизионной съемки

Натурные исследования продолжились на действующем не горящем породном отвале шахты имени В.И. Ленина, на действующем горящем породном

отвале шахты имени С.М. Кирова и на недействующем не горящем породном отвале шахты 13-бис.

При проведении натурных исследований поверхности породных отвалов шахты им. В.И. Ленина, шахты им. С.М. Кирова, шахты 13-бис были выявлены очаги самонагрева (рис. 4.8). Фиксируемая энергетическая светимость очагов самонагрева представлена Приложении В.

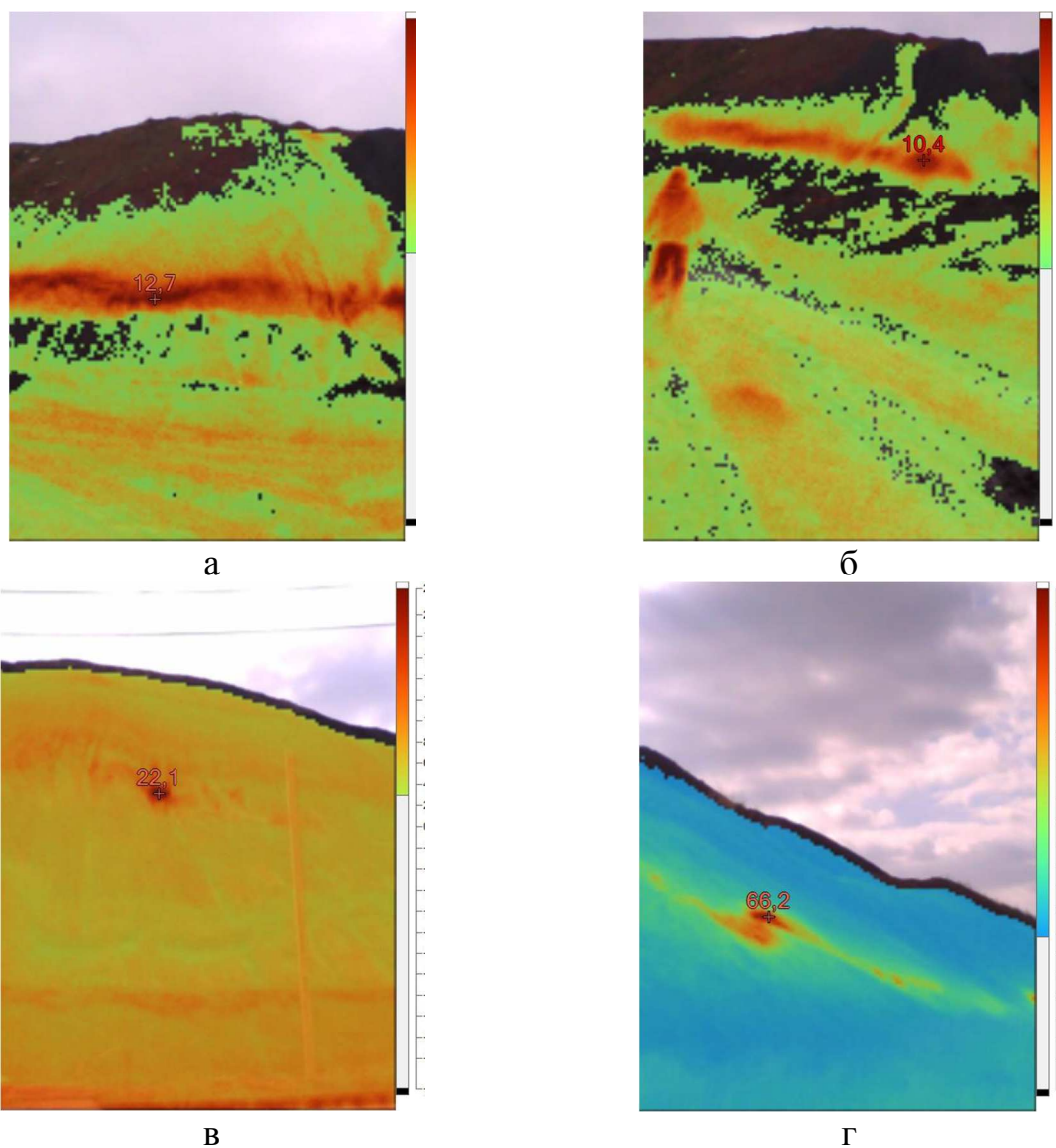


Рис. 4.8. Фотографии тепловизионной съемки породных ПО: а, б – шахты им. В.И. Ленина (В1); в – шахты им. С.М. Кирова (Г1); г – шахты 13-бис (Д1).

Энергетическая светимость, полученная в результате натурных исследований, была обработана с расчетом статистических показателей и проверкой на однородность и достоверность (табл. 4.5).

Табл. 4.5. Результаты проверки данных натурных исследований

Очаг самонагревания	Однородность выборки		Достоверность выборки						
	Критерий Стьюдента		Кэф. вариаци и	Правило трех сигм				Критерий χ^2 Пирсона	
	t _ф (макс)	t _т		А	Е	3 σ_a	3 σ_e	χ^2_{ϕ}	χ^2_{τ}
В1	1,42	2,57	4	0,267	-1,18	3,000	6,000	3,69	3,84
Г1	1,57	2,57	11	0,799	-0,41	3,000	6,000	3,55	3,84
Д1	1,41	2,57	3	0,072	-0,57	3,000	6,000	3,72	3,84

Проверка на однородность с помощью критерия Стьюдента показала, что данные натурных исследований ПО шахт им. В.И. Ленина, им. С.М. Кирова, 13-бис являются однородными, т.к. расчетное значение критерия Стьюдента (t_{ϕ}) меньше теоретического (t_{τ}).

Расчет асимметрии и эксцесса показал, что энергетическая светимость, определенная при натурных исследованиях поверхности ПО шахты им. В.И. Ленина, шахты им. С.М. Кирова, шахты 13-бис достоверна. Коэффициент вариации составил менее 33%, что соответствует распределению генеральной совокупности по нормальному закону. Гипотеза о соответствии генеральной совокупности нормальному закону распределения подтверждается, т.к. теоретическое значение χ^2_{τ} меньше фактического значения χ^2 Пирсона.

При увеличении расстояния натурных исследований (L , м), энергетическая светимость (R , Дж / (с·м² · К⁴)) уменьшается по степенной зависимости (рис. 4.9., табл. 4.6).

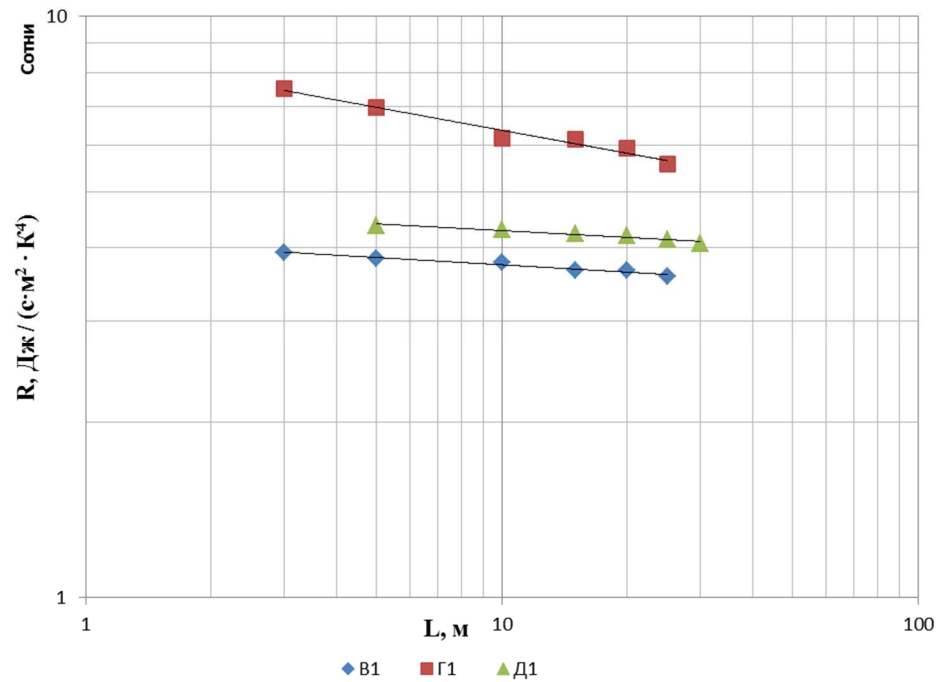


Рис. 4.9. Фиксируемая энергетическая светимость при съемке породных отвалов шахт им. В.И. Ленина, шахты им. С.М. Кирова, шахты 13-бис

Табл. 4.6. Зависимости энергетической светимости от расстояния съемки породных отвалов

Очаги самонагрева	Уравнение	Коэффициент детерминации
Шахта им. В.И. Ленина	$R = 411L^{-0,042}$	$R^2 = 0,9674$
Шахта им. С.М. Кирова	$R = 860L^{-0,131}$	$R^2 = 0,9684$
Шахта 13-бис	$R = 468L^{-0,039}$	$R^2 = 0,9434$

Энергетическая светимость очага самонагрева на отвале шахты им. С.М. Кирова, с контактной температурой 105°C , с увеличением расстояния съемки уменьшается интенсивнее, чем энергетическая светимость низкотемпературных очагов самонагрева на ПО шахт им В.И. Ленина и 13-бис. Обнаруженный на недействующем и не горящем породном отвале шахты 13-бис очаг самонагрева с контактной температурой 48°C показал, что на недействующих и не горящих ПО происходит низкотемпературное окисление породного массива.

4.3 Влияние расстояния дистанционного контроля температуры на температурный контраст

Анализ результатов натурных исследований проведен с учетом величины температурного контраста (формула 2.46). Коэффициент теплопроводности породных отвалов Донбасса по данным литературных источников составляет 0,28 Дж/м*К*с [31]. Коэффициент теплопроводности атмосферы при натурных исследованиях составлял 0,0259 Дж/м*К*с. Эквивалентный диаметр очагов самовозгорания (d , м) составлял от 0,4 м до 0,8 м. Температурный контраст (ΔT) между очагом самовозгорания и тепловизором, определенный при натурных исследованиях с увеличением расстояния (L , м) дистанционной температурной съемки уменьшается по степенной зависимости с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$ (рис. 4.10) [134, 135]:

$$\Delta T = 0,993L^{-1,81} \quad (4.1)$$

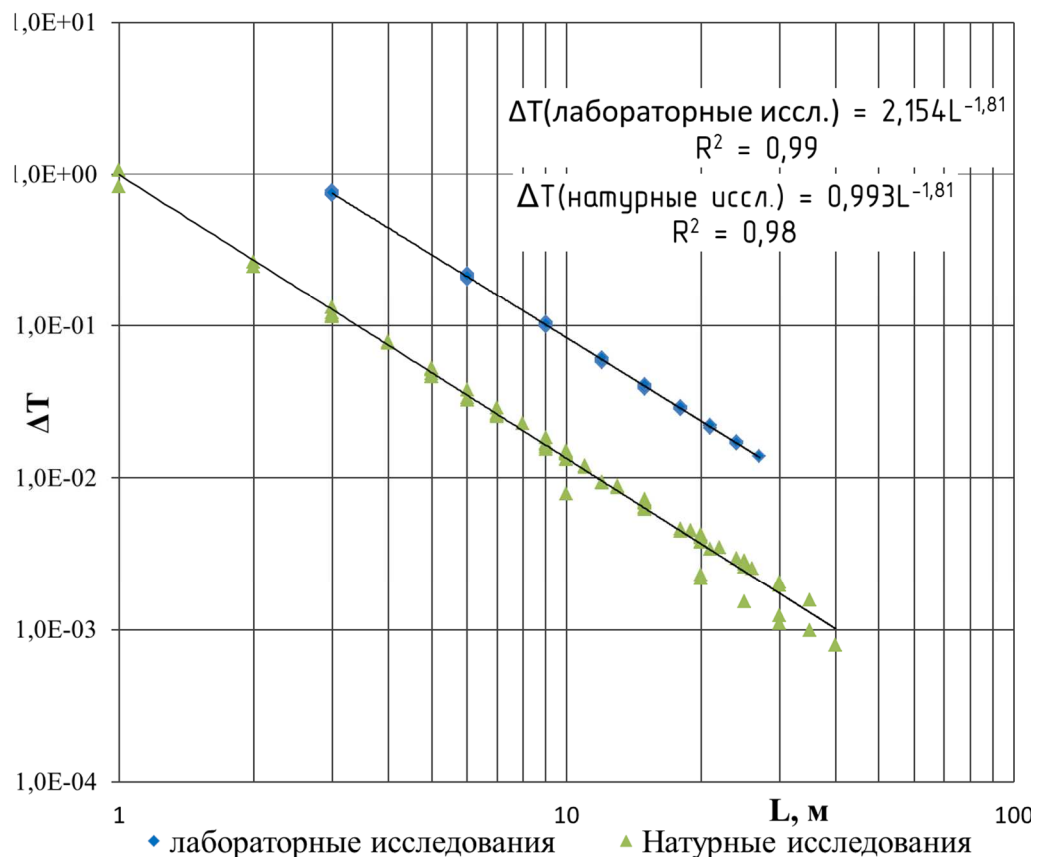


Рис. 4.10. Зависимость температурного контраста (ΔT) тепловизионной съемки от расстояния (L)

Оценим статистическую значимость коэффициентов регрессии ($a=0,993$, $b=-1,81$) с помощью t-критерия Стьюдента.

Если фактическое значение t-критерия больше табличного, то основную гипотезу отвергают и считают, что с вероятностью 0,95 параметр или статистическая характеристика в генеральной совокупности значимо отличается от нуля. Если фактическое значение t-критерия меньше табличного, то параметр или статистическая характеристика в генеральной совокупности незначимо отличается от нуля при уровне значимости 0,95.

Проведем анализ точности определения оценок коэффициентов регрессии - несмещенную оценку дисперсии возмущений (S^2) и стандартное отклонение коэффициентов a и b (S_a , S_b) (табл. 4.7).

Табл. 4.7. Анализ результатов точности определения оценок коэффициентов регрессии

Параметр	Значение
$S^2 = \frac{\sum(y_i - y_x)^2}{n - m - 1}$	4,01
$S_a = S \frac{\sqrt{\sum x^2}}{n S(x)}$	0,62
$S_b = \frac{S}{\sqrt{n} S(x)}$	0,45

Табличное значение критерия Стьюдента равно: $t_r = 1,98$. Фактические значения критериев Стьюдента равны: $t_b = \frac{b}{S_b} = 3,02$; $t_a = \frac{a}{S_a} = 2,18$. Так как $t_a > t_r$ и $t_b > t_r$ статистическая значимость коэффициентов регрессии a и b подтверждается.

Оценка статистической значимости парной линейной регрессии производится по критерию Фишера. Фактическое значение F-критерия $F = 3860$. Табличное значение критерия со степенями свободы $F_{\text{табл}} = 109$. Поскольку фактическое значение $F > F_{\text{табл}}$, то коэффициент детерминации статистически значим (найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна).

Температурный контраст, определённый при натурных исследованиях, как и при выполнении лабораторных исследований, обратно пропорционален расстоянию в степени 1,8 (рис. 4.10).

Используя уравнение критериального вида (формула 2.42) и закон Стефана-Больцмана определим энергетическую светимость очага самонагревания А5, выявленного при натурных исследованиях на породном отвале шахты «Октябрьский рудник» (рис. 4.11).

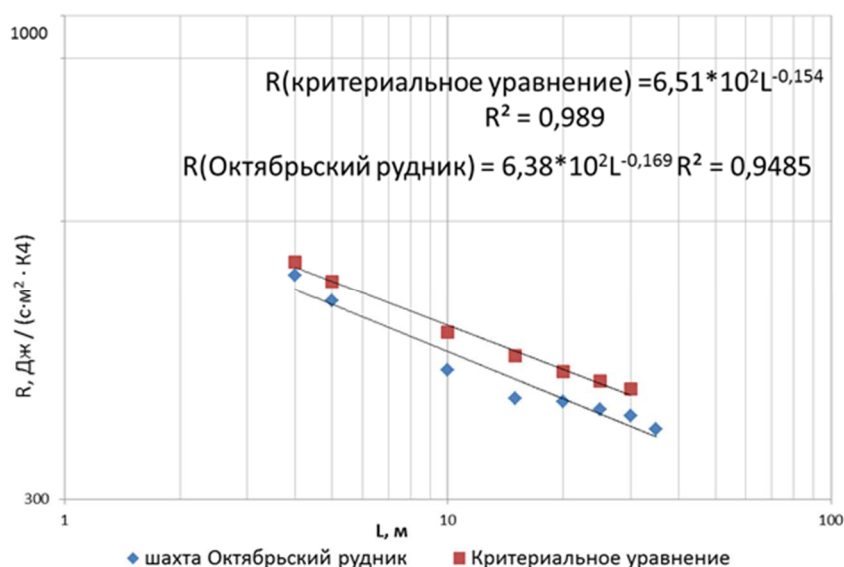


Рис.4.11. Зависимость энергетической светимости (R) от расстояния съемки (L) при ракурсе 90°

Распределение энергетической светимости очага самовозгорания на породном отвале шахты «Октябрьский рудник» при увеличении расстояния дистанционной съемки соответствует энергетической светимости, полученной при использовании уравнения критериального вида, что говорит об адекватности разработанного уравнения.

4.4 Процессы окисления в зонах эрозии

При совместном действии солнечной радиации, осадков и температурных колебаний в поверхностном слое отвальной массы происходят эрозионные процессы, в результате чего образуются промоины. Они представляют собой выемки в поверхности породного отвала, располагающиеся от вершины породного отвала к его основанию. У основания породного отвала ширина промоин может достигать нескольких метров.

ПО угольных шахт негативно влияют на прилегающие территории. В частности, эрозионные процессы на таких отвалах приводят к формированию овражно-балочной системы на отвалах, что сокращает площадь земель пригодных для рекультивации. Кроме этого, вынос веществ из тела отвала приводит к деградации находящихся в природном состоянии почв санитарно-защитной зоны [133].

В ходе проведения натурных исследований было установлено, что в местах эрозионных процессов на ПО показатели температуры больше чем на поверхности отвала (рисунок 4.12). Анализ тепловизионной съемки ПО шахты 13-я бис показал, что разница между температурой в очаге эрозионных процессов и температурой поверхности породного отвала, не подверженной эрозионным процессам ($\Delta T = T_{эр} - T, ^\circ C$) составляет от $1,9^\circ C$ до $4,8^\circ C$. При анализе тепловизионной съемки породного отвала шахты им. В.И. Ленина установлено, что ΔT составляет от $0,9^\circ C$ до $6,1^\circ C$, при анализе тепловизионной съемки породного отвала шахты им. М.И. Калинина установлено, что ΔT составляет от $0,9^\circ C$ до $2,6^\circ C$ [134, 135].

Повышение температуры очагов эрозии породных отвалов наблюдалось от вершины породного отвала к его основанию.

Необходимо отметить, что породный отвал шахты им. М.И. Калинина является горящим и действующим, породный отвал шахты им. В.И. Ленина является не горящим и действующим, породный отвал шахты 13-я бис не горящий и недействующий. Тепловизионная съемка показала, что в местах

эрозионных процессов повышение температуры всех рассмотренных отвалов составляет от $0,9^{\circ}\text{C}$ до $6,1^{\circ}\text{C}$. Таким образом, экспериментально установлено, что окисление соединений серы, фосфора, железа и других элементов происходит и на не горящих и недействующих породных отвалах.

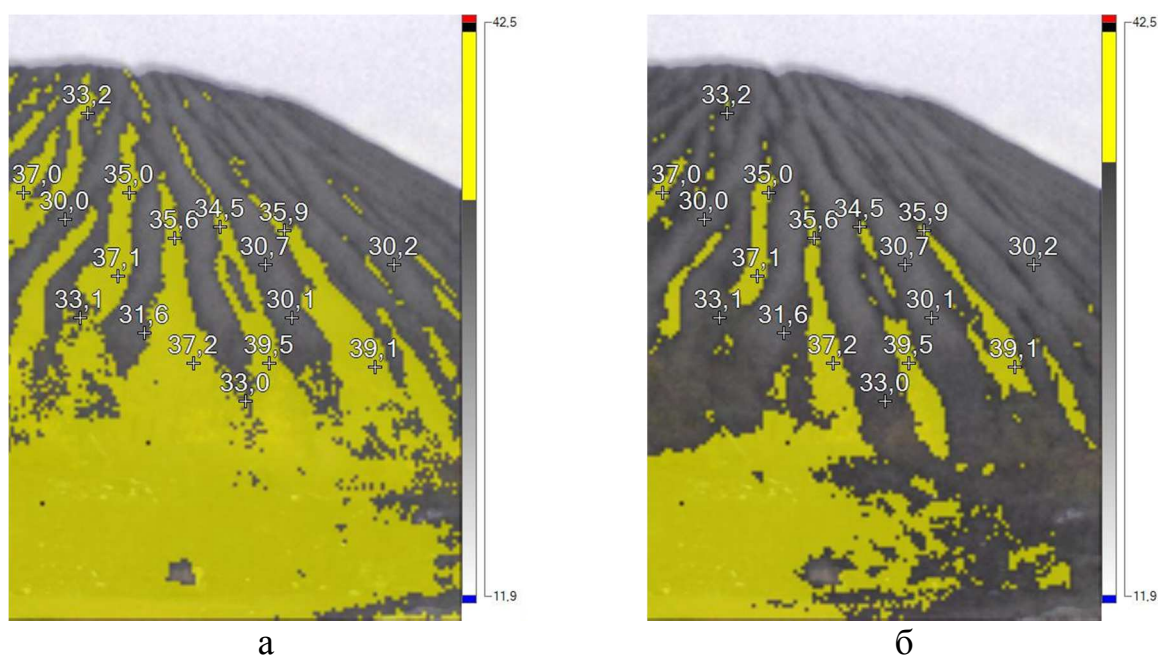


Рис.4.12. Фотографии натурных исследований ПО шахты 13-я бис (распределение диапазона температур 33°C - 42°C (а), 35°C - 42°C (б))

При анализе результатов тепловизионной съемки (рисунок 4.12) была рассчитана относительная площадь участков с повышенной температурой. Результаты показали, что площадь участков с повышенной температурой составляет 20..25% [136, 137].

Повышенные показатели температуры в очагах эрозионных процессов свидетельствуют о процессах окисления соединений серы, фосфора, железа и других элементов.

Водные и ветровые эрозионные процессы являются одной из причин самовозгорания породных отвалов. Из вышеизложенного следует, что необходимо проводить мониторинг теплового состояния отвалов, т.е. регулярную температурную съемку.

4.5 Исследование выбросов вредных веществ при окислении горных пород и определение стадии их горения

Для выявления очагов самовозгорания (в дополнение к дистанционному контролю теплового состояния ПО) целесообразно осуществлять контроль состава их выбросов. Для изучения состава выбросов ГПО выполнены экспериментальные исследования очагов самонагревания и самовозгорания на отвале шахты им. М.И. Калинина.

Исследования проводились с использованием газоанализатора ОКСИ-5М (свидетельство о поверке №84026/1 до 05.02.19), позволяющего проводить измерения концентраций оксидов азота, углерода, диоксида сера, содержания кислорода и температуры выбросов; индикаторных трубок и измерителя скорости ИС-2. Всего было проведено 26 измерений (рис. 4.13). Относительная погрешность измерения концентраций токсичных газов с применением газоанализатора - 5%, индикаторными трубками – 25%.



Рис. 4.13. Генплан породного отвала шахты им. М.И. Калинина

В процессе проведения исследований использовалась труба высотой 1,5 м и диаметром 0,15 м, которая позволила снизить влияние турбулентности атмосферы на измерения (рис. 4.14). Результаты измерений приведены в Приложении Г. Измерения газового состава проводились на выявленных с помощью дистанционных методов очагах самонагревания с учетом требований техники безопасности. Проведенные исследования показали, что участки эрозии поверхности породных отвалов, вследствие активизации в них окислительных процессов, представляют собой места повышенного негативного воздействия на окружающую среду из-за усиления образования загрязняющих веществ.



Рис.4.14. Измерение концентраций загрязняющих веществ на породном отвале шахты им. М.И. Калинина

При проведении анализа вредных выбросов выявлены очаги самонагревания на участках ПО покрытых растительностью (рис. 4.15). Это свидетельствует о том, что растительность не является показателем отсутствия горения ПО. Глубинное горение может продолжаться более 10 лет после прекращения эксплуатации отвала.



Рис. 4.15. Исследования выбросов ГПО шахты им. М.И. Калинина

До проведения отбора проб и тепловизионной съемки поверхность ПО обследуется, участки ПО, на которых выявлены пустоты, трещины, и участки с рыхлой поверхностью ограждаются, возле них устанавливаются предупредительные знаки. Температурные съемки и анализ проб не проводят при грозах и ливневых осадках, при обнаружении признаков деформации поверхности породного отвала.

Труба для отбора проб устанавливается поочередно на каждом выявленном очаге самовозгорания. Согласно соответствующим методикам был определен объемный расход и скорость выброса газов на очаге самовозгорания. Дальнейшие исследования были направлены на определение концентрации основных загрязняющих веществ. Расчет массового расхода (г/с), полученного при измерениях, проводился с учетом площади очага тепловыделения.

Повышение температуры очагов эрозии породных отвалов наблюдалось от вершины породного отвала к его основанию. При этом концентрация загрязняющих веществ в местах эрозии составила: 4..8 ПДК SO_2 , 2..10 ПДК NO_2 , 10..15 ПДК CO .

Проведенные исследования в очагах самовозгорания свидетельствуют о превышении ПДК следующих загрязняющих веществ в газах, выбрасываемых при горении породного отвала: диоксид азота – до 20 ПДК; оксид углерода – до 140 ПДК; диоксид серы – до 30 ПДК; сероводорода – до 120 ПДК.

Проведенный расчет рассеивания выбросов загрязняющих веществ при горении породного отвала шахты им. М.И. Калинина показал превышения ПДК на границе СЗЗ и жилья по диоксиду серы (2,87 ПДК на жилье, на СЗЗ 1,44 ПДК), по суммарному действию оксида азота и диоксида серы (4,30 ПДК на жилье, 2,17 ПДК на СЗЗ), по оксиду азота (на жилье 1,2 ПДК, 0,75 ПДК СЗЗ), сероводороду (20,8 ПДК на СЗЗ, 15,89 ПДК на жилье), по суммарному действию сероводорода и диоксида серы (21,8 ПДК на СЗЗ, 15,5 ПДК на жилье) (рис. 4.16).

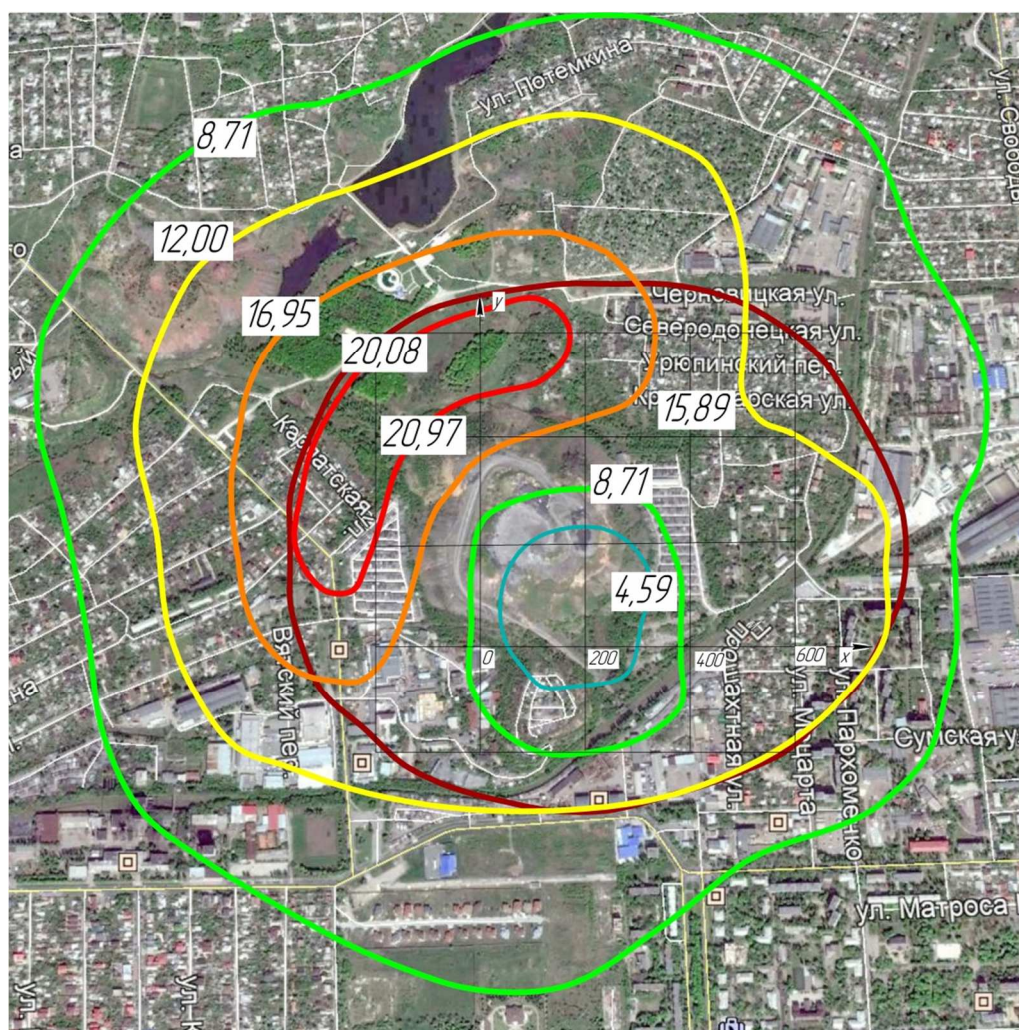


Рис. 4.16. Зоны рассеивания сероводорода при горении породного отвала шахты им. М.И. Калинина

Установлено, что выбросы от зон эрозии составляют около 50%, от общего вклада в загрязнение по всем загрязняющим веществам. Зона влияния породного отвала шахты им. М.И Калинина составляет 37 км по сероводороду (рис. 4.17). При этом водные и ветровые эрозионные процессы являются одной из причин начальной стадии самовозгорания породных отвалов.

Выбросы токсичных газов на относительно больших площадях поверхности породных отвалов, подверженных эрозии (25%) при температуре поверхности превышающей фоновую на $1..6^{\circ}\text{C}$ позволили установить приоритетность мероприятий по предупреждению самовозгорания пород.

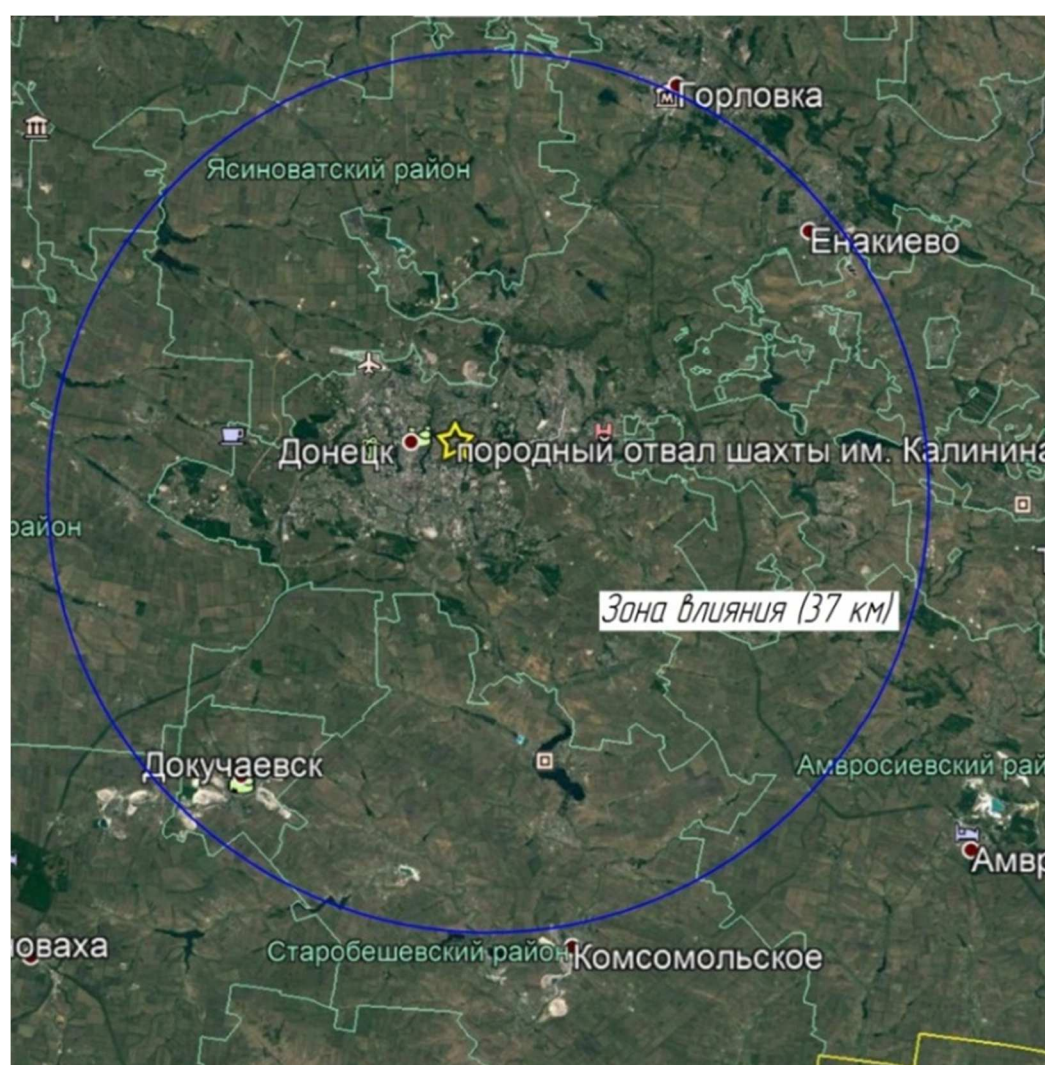


Рис. 4.17. Расчетная зона влияния ПО шахты им. М.И. Калинина

При длительном складировании пустой породы угольных шахт следует в первую очередь предусматривать выполнение противоэрозионных мероприятий на склонах отвалов, как предварительную, начальную стадию их рекультивации. Мониторинг поверхности породного отвала, в том числе зон эрозионных процессов, позволит выявлять очаги самонагрева на ранней стадии горения и своевременно принимать меры по предупреждению самовозгорания пород. Мониторинг рекомендуется проводить и на недействующих некультивированных породных отвалах.

Породные отвалы характеризуются непостоянством состава, оценить стадию их окисления по степени горения топлива практически невозможно. Критерием оценки стадии окисления породных отвалов является степень использования кислорода воздуха необходимого для горения породного массива.

Стадия окисления очагов самонагрева оценивалась при помощи отношения измеренных концентраций CO_2/CO и степени использования O_2 (α_{O_2}):

$$\alpha_{\text{O}_2} = \frac{C_{\text{O}_2} - C_{\text{O}_2\text{изм}}}{C_{\text{O}_2\text{изм}}}, \quad (4.2)$$

где C_{O_2} – средняя концентрация O_2 в воздухе, %, об.;

$C_{\text{O}_2\text{изм}}$ – величина измеренной концентрации O_2 в дымовых газах очага самовозгорания, %, об.

Исследование использования кислорода воздуха для окисления угля и пиритов породных отвалов определило направление процесса горения (рис.4.18):

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = 1301\alpha_{\text{O}_2}^2 + 247\alpha_{\text{O}_2} - 37. \quad (4.3)$$

При развитии процесса в очаге самовозгорания, энергия активации процесса меньше и, следовательно, активное горение происходит с меньшим избытком кислорода, при этом следует отметить, что степень использования кислорода воздуха больше.

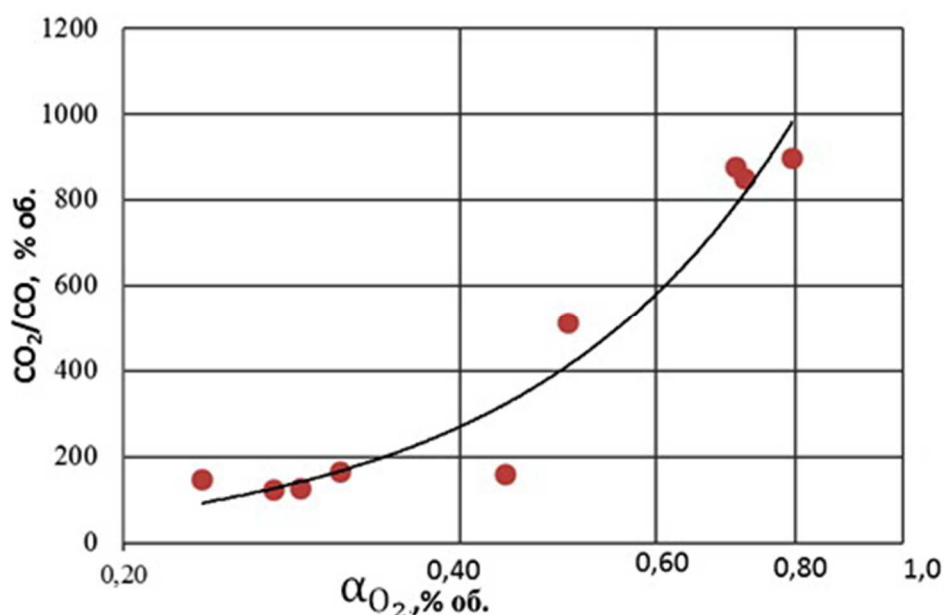


Рис. 4.18. Зависимость изменения CO_2/CO от степени использования кислорода (α_{O_2})

При уменьшении температуры в очаге для знаковой реализации процесса требуется больший избыток кислорода или имеет место меньшая степень его использования. Степень использования O_2 также определяется отношением CO_2/CO и характеризует направление процесса окисления породы. Результаты измерений показали, что по мере окисления породы возрастает концентрация оксида углерода и степень использования O_2 [116,117].

При развитии процесса в очаге самовозгорания, энергия активации процесса меньше и, следовательно, активное горение происходит с меньшим избытком кислорода, при этом следует отметить, что степень использования кислорода воздуха больше.

При анализе данных исследований установлено, что до уровня степени использования кислорода 0,4 происходит его умеренный рост, а после этого уровня наблюдается ускоренный рост степени использования кислорода и отношения CO_2/CO , что характеризует переход от процесса самонагревания к самовозгоранию породного массива.

Используя данные о зонах породных отвалов, характеризующих их физико-химические процессы, и результаты исследований газового состава выбросов

горящих породных отвалов усовершенствуем характеристику этих зон [2] (табл. 4.8).

Исследованиями установлено, что увеличение степени использования кислорода воздуха в дымовых газах приводит к увеличению отношения концентраций CO_2/CO .

Табл. 4.8. Характеристика стадий окисления ПО

Стадии окисления породной массы	Температура, °C	Степень использования кислорода воздуха, % об. д.	CO_2/CO , % об. д.
Низкотемпературное окисление	<80	0 - 0,4	0 - 270
Самовозгорание	80	> 0,4	> 270
Горение	400	-	-
Зона восстановления	600	-	-

Увеличение температуры очага самовозгорания также приводит к увеличению отношению концентраций CO_2/CO . Используя показатели степени использования кислорода воздуха и отношение CO_2/CO можно определить стадию окисления породного массива и своевременно принять меры по ликвидации очага самонагревания.

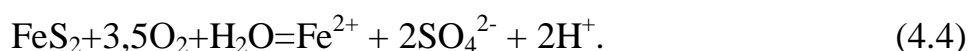
4.6 Исследование процессов генерации выбросов токсичных газов

Основную массу выбросов при горении ПО составляют оксиды углерода, азота, диоксид серы, диоксид углерода и сероводород. Самым токсичным газом, выделяемым при горении породных отвалов, является сероводород. Учитывая ПДК сероводорода ($0,008 \text{ мг/м}^3$), он в 63 раза токсичнее диоксида серы ($\text{ПДК}_{\text{SO}_2} = 0,5 \text{ мг/м}^3$) и в 25 раз токсичнее оксидов азота ($\text{ПДК}_{\text{NO}_x} = 0,2 \text{ мг/м}^3$).

В результате проведенных ранее экспериментальных исследований установлено, что интенсивность газовой выделения при горении ПО увеличивается при атмосферных осадках [138]. При экспериментальных исследованиях,

проведенных зимой на горящем породном отвале шахты им. Калинина, отмечено интенсивное газовыделение с поверхности ПО и резкий запах сероводорода. При исследованиях проведенных весной, в сухую солнечную погоду, отмечена низкая интенсивность газовыделения и отсутствие запаха сероводорода [139, 140].

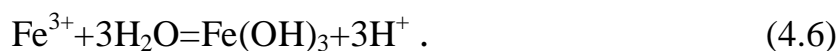
Генерация загрязнений окружающей среды в ПО угольных шахт представляет собой сложный процесс химических и биохимических реакций, результаты которых обнаруживаются на поверхности отвальной породы по увеличению температуры, изменению цвета породы и изменению концентрации токсичных газов. В результате аэробного окисления содержащихся в породе минералов: пирита (FeS_2), галена (PbS), сфалерита (ZnS) и халькопирита (FeCuS_3) в присутствии воды и кислорода происходит окисление породы и образование сульфат ионов по схеме:



При снижении уровня pH по реакции (4.4) ионы двухвалентного железа дальше окисляются до трехвалентного состояния по схеме:



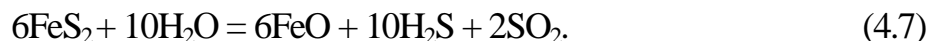
Ион трехвалентного железа после гидролиза образует гидроксид железа, который обнаруживается во многих местах на поверхности породного отвала (рисунок 4.19):



Нетрудно заметить, что процесс генерации загрязнений происходит в присутствии воды. Она необходима для функционирования аэробных и сульфатредуцирующих бактерий.

По данным натурных исследований [43], серосодержащие газы выделяются одновременно из очагов горения угля на аварийном складе и породы в отвале при

температуре около 300°C. При этом, нагретый пирит породного отвала взаимодействует с парами воды [142]:



Механизм образования сероводорода на низкотемпературных очагах самовозгорания не исследован. При горении ПО в атмосферу выбрасывается диоксид серы. Плотность диоксида серы (2,63 кг/м³) больше плотности воздуха (1,28 кг/м³). Таким образом, учитывая стратификацию газов по их плотности, часть диоксида серы находится у поверхности породного отвала. Атмосферная влага, образующаяся при осадках (туман, дождь, снег) реагирует с диоксидом серы:



Учитывая повышенную плотность образовавшейся сернистой кислоты (2,926 кг/м³), она конденсируется у поверхности породного отвала. Сернистая кислота, в результате диффузии реагируя с сульфидом в составе породы, образует сероводород:



Для объяснения механизма генерации сероводорода, являющегося основным токсикантом в газовых выбросах, в натурных условиях на горящем ПО шахты им. М.И. Калинина выполнены экспериментальные исследования по определению влияния увлажнения породы на увеличение концентрации сероводорода.

Исследования проводились на выявленных очагах самовозгорания на горящем породном отвале шахты им. М.И. Калинина. Для измерения концентрации сероводорода (C(H₂S), ppm) использовался газоанализатор УГ-2 и индикаторные трубки. Уточненная проверка содержания сероводорода проводилась с использованием газоанализатора Testo 350XL (относительная погрешность 5%). Увеличение относительной влажности (h, %) проводилось при

помощи пульверизатора. Измерение концентрации диоксида серы ($C(\text{SO}_2)$, ppm) проводилось при помощи газоанализатора ОКСИ – 5М. Свидетельство об аттестации лаборатории приведено в Приложении Д. Относительная влажность воздуха измерялась термогигрометром testo 610 (относительная погрешность 2%) (рис. 4.19). Результаты измерений на выявленном очаге самовозгорания показаны в таблице 4.9.

Табл. 4.9. Результаты измерений на очаге самовозгорания

$t_{\text{атм.}}^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{газа}}^{\circ}\text{C}$	$C(\text{SO}_2)$, ppm	$C(\text{H}_2\text{S})$, ppm	h, %
17	66	15,0	6,0	33,0
17	70	14,2	5,0	35,0
17	75	13,1	7,1	36,0
17	70	14,2	6,0	35,0
17	74	15,3	6,0	35,1



Рис. 4.19. Экспериментальные исследования выбросов сероводорода на ПО шахты им. М.И. Калинина

При увеличении относительной влажности воздуха наблюдалось повышение концентрации сероводорода (табл. 4.10). Концентрация сероводорода ($C(H_2S)$) при увеличении относительной влажности ($h, \%$) изменялась по зависимости с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,87$ (рис. 4.20):

$$C(H_2S) = 1,55 \times 10^{-2} h^{1.67} . \quad (4.10)$$

Известно, что сероводород может генерироваться за счет жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий и реакции взаимодействия сернистой кислоты с пиритом породных отвалов [143].

Табл. 4.10. Результаты измерений влияния относительной влажности воздуха на концентрацию сероводорода в выбросах с поверхности ГПО

h, %	33,0	35,1	36,0	35,0	35,0	45,1	45,0	44,1	43,0	45,0	58,1	57,0	59,1	56,0	57,0	67,0	68,0	69,0	68,0	67,0
$C(H_2S)$, ppm	6,0	5,0	7,0	6,0	6,0	9,0	10,0	10,0	8,1	10,0	11,0	11,0	10,0	11,0	10,0	22,0	21,0	21,0	20,0	21,0

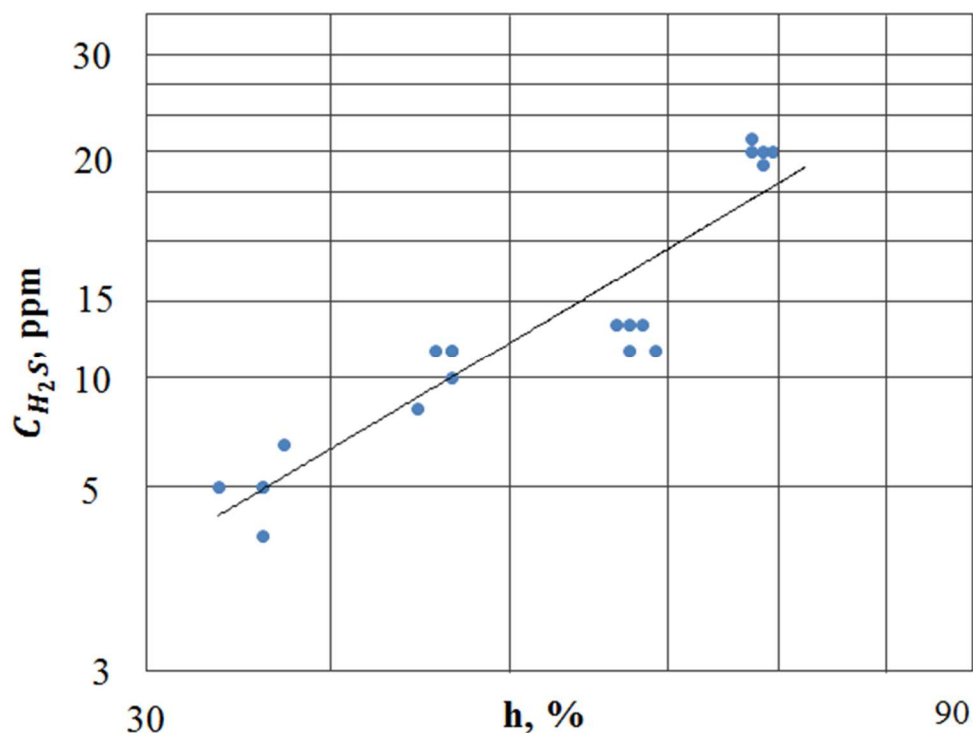


Рис. 4.20. Зависимость концентрации сероводорода (C_{H_2S} , ppm) от относительной влажности воздуха (h , %)

При реакции восстановления сульфат-ионов за счет сульфатредуцирующих бактерий процесс генерации требует значительного времени. В результате эксперимента обнаружено, что увлажнение породы методом распыления воды сопровождается практически мгновенным увеличением концентрации сероводорода. Это свидетельствует о предпочтительном механизме повышения концентрации сероводорода за счет реакции сульфида с сернистой кислотой.

При взаимодействии выбросов сероводорода и диоксида серы по известному процессу Клауса образуется элементарная сера. При этом на поверхности породного отвала возникает налет серы (рисунок 4.21).



Рис. 4.21. Отложения элементарной серы на поверхности породного отвала шахты им. М.И. Калинина

Учитывая высокую токсичность сероводорода, при тушении поверхностных очагов на горящих породных отвалах необходимо в первую очередь предусматривать мероприятия по его нейтрализации.

Шведскими исследователями установлено, что увеличение показателя pH приводит к уменьшению концентрации сероводорода при разных температурах (рисунок 4.22) [143].

В качестве мероприятия по нейтрализации сероводорода рекомендуется обработка очагов самовозгорания с использованием раствора извести.

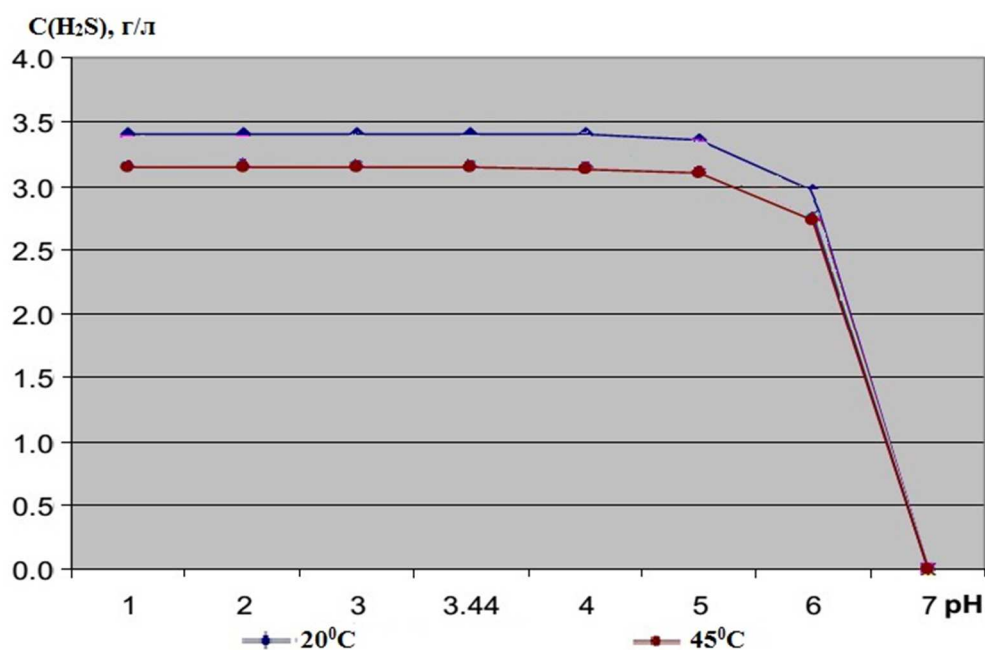


Рис. 4.22. Влияние величины водородного показателя pH показателя на концентрацию сероводорода [143]

Эмиссия диоксидов серы для условий эксперимента ($t = 74^{\circ}\text{C}$), при использовании расчетных методик составит $27 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$ [66]. Площадь очага самовозгорания в условиях эксперимента составляет около 2 м^2 . Таким образом, для предотвращения образования сероводорода на очаге самовозгорания площадью 2 м^2 необходимо 108 г извести. Вышеуказанные мероприятия рекомендуется проводить с использованием беспилотных летательных аппаратов.

4.7 Выводы

1. Разработана методика натурных исследований теплового состояния породных отвалов.
2. Натурными исследованиями подтверждено, что распределение фиксируемой энергетической силы света очага самовозгорания в зависимости от ракурса съемки, полностью соответствует закону Ламберта.
3. Увеличение расстояния тепловизионной съемки породных отвалов приводит к уменьшению фиксируемой энергетической светимости. При этом, энергетическая светимость высокотемпературных очагов самовозгорания уменьшается значительно, чем энергетическая светимость низкотемпературных очагов самонагрева.
4. Температурный контраст между очагом самовозгорания и тепловизором, определённый при натурных исследованиях, как и при лабораторных исследованиях, обратно пропорционален расстоянию в степени 1,8.
5. Экспериментально установлено, что в местах эрозии поверхности породных отвалов угольных шахт происходит низкотемпературное окисление отвальной массы. Окисление происходит на всех типах породных отвалов с различным уровнем экологической опасности. Диапазон повышения температуры в местах эрозии на обследованных отвалах составлял $1...6^{\circ}\text{C}$, а величина площади участков с повышенной температурой составляет около 25%.
6. Предложен и обоснован метод оценки стадии окисления породных отвалов по соотношению концентраций диоксида углерода к оксиду углерода и по степени использования кислорода.
7. Экспериментальными исследованиями показано, что процесс генерации сероводорода на поверхности горящих породных отвалов обусловлен реакцией сернистой кислоты с пиритом породы.
8. Установлено, что увеличение относительной влажности атмосферы в 2 раза сопровождается повышением степени генерации наиболее токсичного

компонента газовых выбросов - сероводорода в 3 раза в низкотемпературных зонах на поверхности горящих породных отвалов.

9. Экспериментально установлено, что выбросы в атмосферу от низкотемпературных зон эрозии на поверхности породных отвалов, занимающие площадь 20..25% поверхности отвала, составляют около 50% от общего вклада в загрязнение по всем загрязняющим веществам.

10. Экспериментально определена приоритетность мероприятий по предотвращению загрязнения атмосферного воздуха ПО горнопромышленных агломераций за счет распыления извести в очагах горения.

РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ

5.1 Влияние стадий метаморфизма угля на расстояние дистанционного контроля и эмиссии оксидов углерода

Угли разной стадии метаморфизма избирательно проявляют интенсивность самовозгорания на разных стадиях окисления породных отвалов.

Угли высокой стадии метаморфизма характеризуются низким выходом летучих веществ и повышенной пористостью. Это обуславливает высокую концентрацию кислорода и может свидетельствовать о преобладании стадии химического окисления угля при самовозгорании породных отвалов. Угли низкой стадии метаморфизма характеризуются высоким содержанием влаги, что, предположительно, может оказывать влияние на биохимическую стадию окисления угля.

В процессе выполнения настоящей работы установлено, что фиксируемый коэффициент теплоотдачи в атмосферу, определённый при дистанционном измерении температуры очагов самовозгорания на породных отвалах, образованных при добыче угля высокой стадии метаморфизма (угли Донецкого и Подмосковного бассейнов), будет выше, чем фиксируемый коэффициент теплоотдачи в атмосферу при измерении очагов на поверхности породных отвалов, образованных при добыче угля низкой стадии метаморфизма (угли Челябинского и Печорского бассейнов).

Степень метаморфизма углей влияет на их теплофизические свойства, в частности, на теплопроводность. Увеличение плотности углей с ростом стадии метаморфизма отражается на их тепловых свойствах. Значение коэффициента теплопроводности увеличивается по мере перехода к газовым углям, с одной стороны, к тощим и антрацитам – с другой [144]. Оценим влияние расстояния дистанционной температурной съемки на фиксируемый коэффициент

теплоотдачи к атмосфере при использовании углей разных стадий метаморфизма (рис. 5.1).

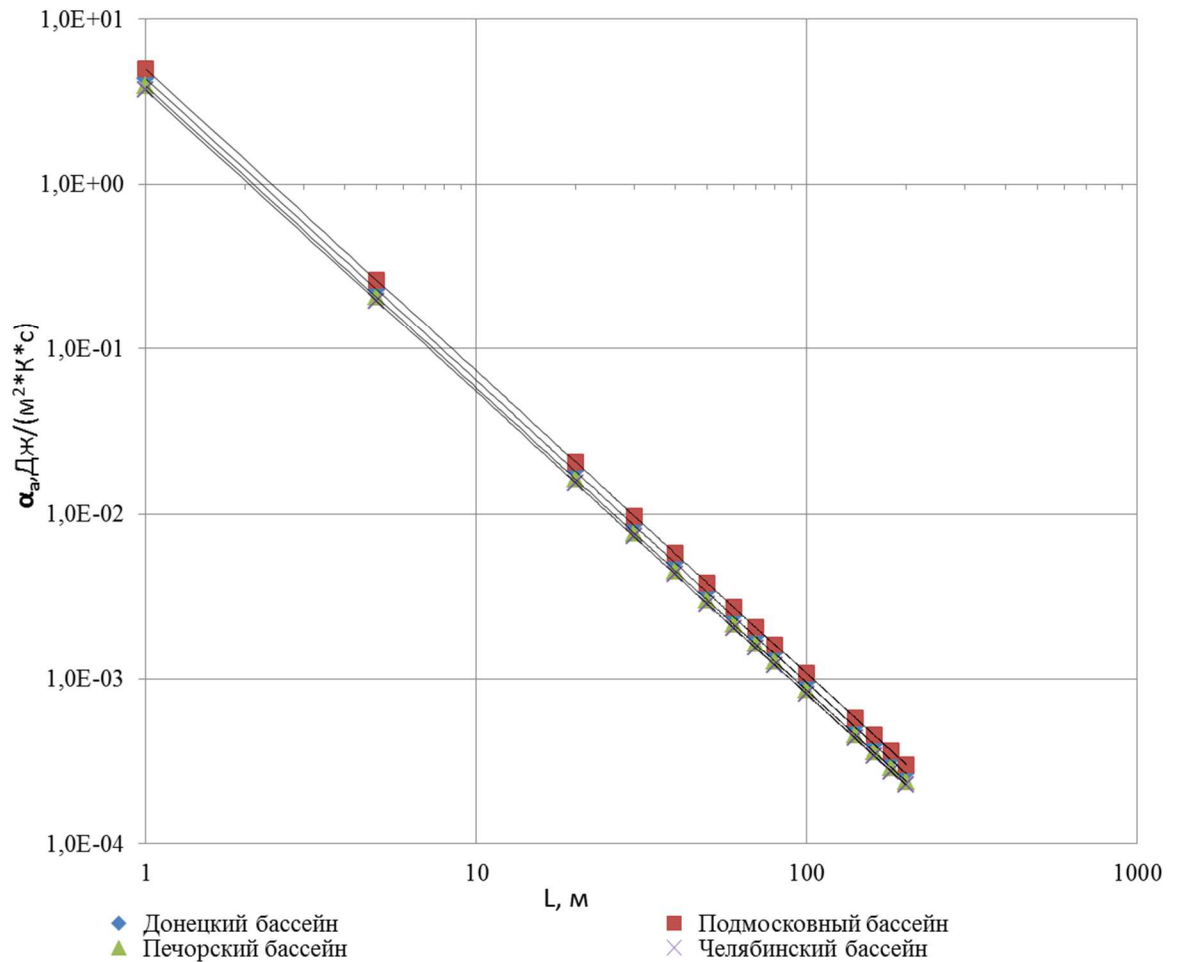


Рис. 5.1. Влияние расстояния между объектом тепловыделения и тепловизором (L , м) на фиксируемый коэффициент теплоотдачи в атмосферу (α_a , $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с})$)

Зависимости распределения коэффициента теплоотдачи к атмосфере от расстояния съемки для различных углей приведены в таблице 5.1.

Табл. 5.1. Зависимости фиксируемого коэффициента теплоотдачи в атмосферу от расстояния съемки для различных углей

Наименование	Зависимость	R^2
Уголь Донецкого бассейна	$\alpha_a = 8,66 \cdot L^{-1,833}$	$R^2 = 0,99$
Уголь Подмосковского бассейна	$\alpha_a = 9,87 \cdot L^{-1,833}$	$R^2 = 0,99$
Уголь Печорского бассейна	$\alpha_a = 7,78 \cdot L^{-1,833}$	$R^2 = 0,99$
Уголь Челябинского бассейна	$\alpha_a = 7,39 \cdot L^{-1,833}$	$R^2 = 0,99$

При использовании уравнения критериального вида установлено, что для ПО, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма расстояние дистанционного контроля больше чем для породных отвалов, образованных при добыче углей ранней стадии метаморфизма. Так расстояние дистанционного контроля ПО с фиксируемым коэффициентом теплоотдачи к атмосфере $1,08 \cdot 10^{-4}$ Дж/(м²·К·с) для углей Подмосковного бассейна составит 143 м, для углей Донбасса – 133 м, для углей Печорского бассейна 125 м, а для углей Челябинского бассейна – 122 м. Выбор предельного расстояния целесообразно осуществлять методом последовательных приближений [116, 117].

Стадии метаморфизма углей могут оказывать воздействие на эмиссии загрязняющих веществ. Анализ влияния стадии метаморфизма угля на выбросы загрязняющих веществ проводился с использованием данных выбросов оксида углерода при горении породных отвалов Челябинского, Печорского, Подмосковного и Донецкого угольных бассейнов. Характеристика углей приведена в таблице 5.2.

Табл. 5.2. Характеристика углей с различной стадией метаморфизма

Название угольного бассейна	Зольность, %	Сера, %	Теплота сгорания, ккал/кг	Влага, %	Выход летучих, Vdaf
Челябинский бассейн	37	1,5	4369	21,0	22
Печорский бассейн	30	1	8600	11,0	32
Подмосковный бассейн	31	3	6750	32,5	46
Донецкий бассейн	17	2,4	6209	4,0	40

Анализ обработанных результатов исследований выбросов оксида углерода показал, что горение ПО, образованных при добыче углей низкой стадии метаморфизма приводят к более значительным выбросам, чем при горении породных отвалов, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма (рис. 5.2).

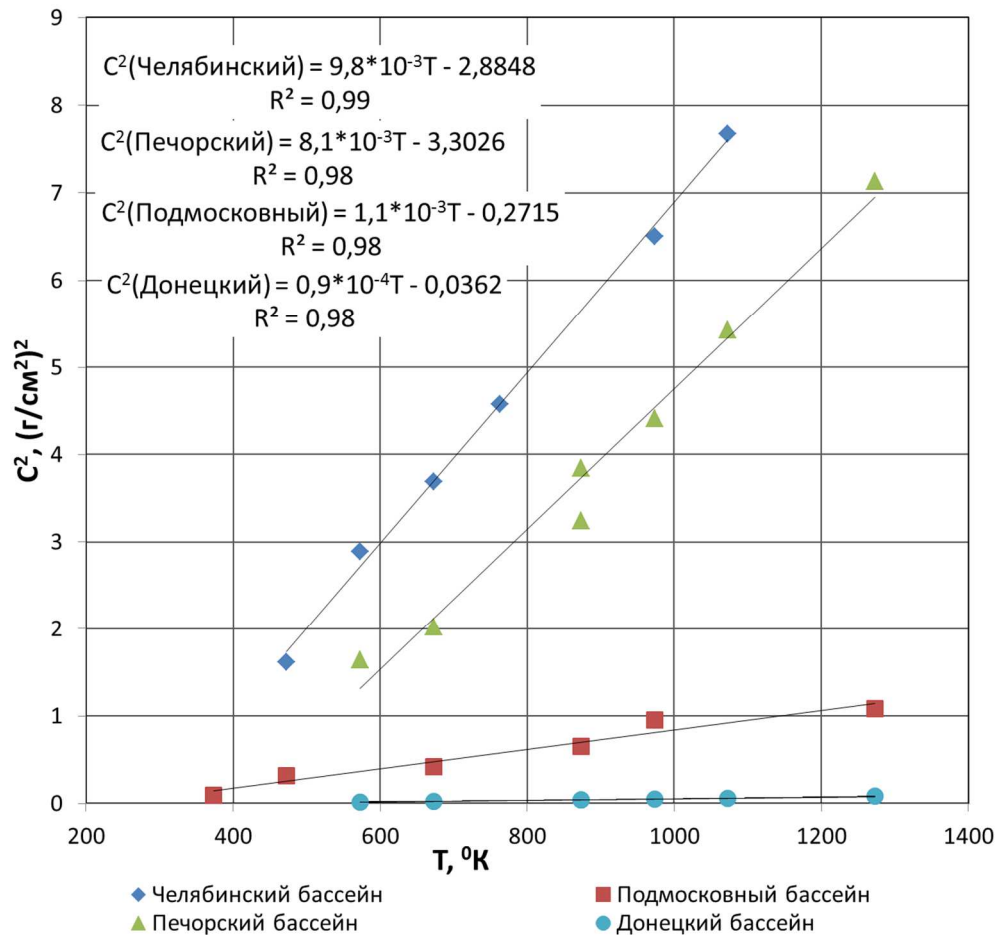


Рис.5.2. Зависимость квадрата эмиссии оксида углерода (C^2 , $(\text{г/см}^2)^2$) от температуры очага самовозгорания (T , K)

Эмиссии оксида углерода при горении породного отвала Челябинского угольного бассейна зависят от температуры очага горения (T , °K) и распределяются по закону, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,99$:

$$C = \sqrt{0,0098T - 2,8848}. \quad (5.1)$$

Эмиссии оксида углерода при горении породного отвала Печорского угольного бассейна распределяются по закону с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$:

$$C = \sqrt{0,0081T - 3,3026}. \quad (5.2)$$

Эмиссии оксида углерода при горении породного отвала Подмосковского угольного бассейна распределяются по закону, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$:

$$C = \sqrt{0,0011T - 0,2715}. \quad (5.3)$$

Эмиссии оксида углерода при горении породного отвала Донецкого угольного бассейна распределяются по закону, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,99$:

$$C = \sqrt{0,00009T - 0,0362}. \quad (5.4)$$

5.2 Обоснование периодичности теплового контроля и оценка его стоимости

Беспилотные летательные аппараты позволяют обеспечить своевременное обнаружение очагов тепловыделения на начальной стадии горения. Крупные БПЛА могут быть использованы для непосредственного тушения пожаров на ПО.

Основным средством, предупреждения самовозгорания и тушения очагов пожара является применение изолирующих материалов. Недостатком этого метода является частичная или полная консервация отвала на период проведения работ по тушению. Кроме этого при тушении очагов в сложно доступных местах возможно нарушение их теплового режима, что может привести к образованию новых очагов возгорания.

При использовании БПЛА можно избежать этого недостатка. БПЛА вертолетного типа (например «Ворон 700») может притормаживать в воздухе над очагом самовозгорания и сбрасывать на него изолирующие пожар материалы. Использование БПЛА позволяет оперативно локализовать и ликвидировать очаги самовозгорания на ранней стадии.

Время проведения температурной съемки и подготовки отчета при использовании действующей контактной методики составляет около 1 месяца. Использование дистанционных способов контроля позволяет проводить около 10

съемок в месяц, что обеспечивает проведение контроля теплового состояния горящих породных отвалов Донецкой Народной Республики (140 отвалов) в течение года. Мероприятия по тушению очагов самовозгорания с помощью беспилотных летательных аппаратов предотвратят экологический ущерб от их горения - до 500 млн. руб./год.

Известно, что ущерб, наносимый окружающей среде и здоровью населения, а также стоимость мероприятий по тушению очагов самовозгорания на поздней стадии горения превышает стоимость мониторинга теплового состояния породных отвалов.

Затраты на температурную съемку, мероприятия по снижению температуры, расчет выбросов в атмосферный воздух и экологический ущерб от выбросов загрязняющих веществ с поверхности горящего породного отвала (3) равны:

$$З = An + \frac{B}{n}, \quad (5.5)$$

$$\frac{dЗ}{dn} = A - \frac{B}{n^2}, \quad (5.6)$$

где А-затраты на температурную съемку и меры по снижению температуры, руб.;

В – предотвращенный экологический ущерб, руб.;

n – частота замеров, год⁻¹.

Годовая периодичность замеров (τ , год⁻¹) будет равна:

$$\tau = 12 \sqrt{\frac{A}{B}}. \quad (5.7)$$

Для горящего породного отвала шахты им. М. И. Калинина выплаты по экологическому налогу за выбросы составляют ежегодно около 3,5 млн. руб. (табл.5.3).

Табл. 5.3. Расчет экологического ущерба при горении породного отвала шахты им. М. И. Калинина

Загрязняющее вещество	Выбросы, тонн/год	Ставка налога руб./тонну	Экологический ущерб, тыс. руб.
H ₂ S	87,78	9987	876, 658
SO ₂	724,9	3108	2 252, 989
CO	2676,97	117	313, 205
NO _x	2,616	3108	8, 130
Сумма			3 450, 984

Периодичность мониторинга зависит от факторов, которые влияют на самовозгорание породных отвалов: расположение отвалов на подветренной стороне местности; увлажнение отвалов атмосферными осадками и водотоками местности; количества солнечных дней и интенсивность солнечной радиации.

Известно, что время достижения углем температуры самовозгорания составляет 21 сутки в летний период при низкой влажности и отсутствии перепадов дневной и ночной температуры, а в осенний период время самовозгорания возрастает до 36 суток [145]. Породы отвалов шахт Донбасса содержат большое количество угля. По данным Южгипрошахт в отвальной массе угля размером от 25 мм содержится от 1,7 до 12,4%.

Стоимость одной тепловой съемки и тушения очага самонагревания на ранней стадии окисления составляет около 41 000 руб. (табл. 5.4).

Таким образом, учитывая экономическое обоснование периодичности и время достижения углем температуры самовозгорания, мониторинг теплового состояния породных отвалов рекомендуется проводить с периодичностью 1 раз в месяц.

Табл.5.4. Расчет стоимости дистанционного контроля

Параметр	Затраты, тыс. руб.
Общая стоимость оборудования	7 600
БПЛА для контроля и тепловизор	600
БПЛА для тушения	7 000
Амортизация	497
Валовые затраты	5 467
Цена на 1 съемку и тушение	41
Предотвращённый экологический ущерб	3 500

Кроме этого мониторинг дополнительно проводится в дни с температурой превышающей среднюю в данный период, и в дни после осадков, если количество осадков превышает норму за данный период. Оптимальная периодичность теплового контроля позволит своевременно принимать меры по предотвращению самовозгорания породных отвалов [62].

При использовании существующей технологии, исходя из трудозатрат и расценок, установленных согласно «Сборника цен и расценок...» СЦиРКС-82, скорректированных в соответствии с ДБН-IV-16-1996 и ДБН-Д-1.1.-7-2000, при расчете стоимости температурной съемки учитывают следующие основные операции: составление плана поверхности породного отвала; разметка и разбивка территории; ручное бурение шпуров по породам; измерение температуры; обработка результатов измерений; составление карты изотерм.

Стоимость температурной съемки одного гектара поверхности отвала, с учетом дополнительных работ и расходов, по данным различных организаций составляет примерно $C_1=8000$ руб./га.

Полная стоимость выполнения работ по породному отвалу составит:

$$C=C_1*S*k_n, \quad (5.8)$$

где S – площадь поверхности породного отвала, га;

$k_n=1.2...1,4$ – коэффициент дополнительных трудозатрат на расчет количества выделяющихся газов, составление и согласование итогового отчета.

При средней площади отвала, составляющей около 20 га, полная стоимость выполнения работ составит $C_1=8000*20*1,3=208000$ руб.

Сопоставление стоимости выполнения работ по температурной съемке и определению выбросов токсичных газов с породных отвалов при использовании существующей и предлагаемой технологии показало, что рекомендуемая технология дистанционной температурной съемки и определения выбросов токсичных газов с породного отвала позволяет снизить стоимость работ в $C_1/C_2=208000/(41000) = 5$ раз.

5.3 Рекомендации по дистанционному контролю теплового состояния ПО

Основу методических рекомендаций по контролю теплового состояния ПО составляют дистанционные методы и способы определения температуры их поверхности.

Контроль теплового состояния проводится по температуре поверхности ПО и по выбросам при окислении породного массива. Оперативность выполнения дистанционного контроля теплового состояния породных отвалов обеспечивается БПЛА. Своевременное выявление низкотемпературных очагов самонагревания на поверхности ПО позволит предотвратить и ликвидировать негативное воздействие высокотоксичных компонентов выбросов при горении породных отвалов на жителей горнопромышленных агломераций.

Использование тепловизоров дает возможность обнаружить потенциальные очаги тепловыделения на ранних стадиях. Это может быть полезным при определении приоритетности работ по предотвращению самовозгорания.

При дистанционном контроле теплового состояния породных отвалов предусматривается использование следующего оборудования: беспилотный

летательный аппарат с тепловизором, газоанализатор, аспирационный психрометр, ручной чашечный анемометр по ГОСТ 6376-74.

*Рекомендации по дистанционному контролю теплового состояния
породных отвалов*

1. При выборе расстояния необходимо учесть параметры тепловизора и размеры очага тепловыделения. По данным натурных исследований очаги тепловыделения на поверхности породных отвалов имеют диаметр 0,5..1 м. Для получения точных результатов измеряемый очаг тепловыделения должен быть в 2-3 раза больше наименьшего видимого очага тепловыделения (формула 2.29).

Рассчитывают фиксируемый коэффициент теплоотдачи к атмосфере для следующих теплофизических характеристик: коэффициент теплоотдачи к породе 580 Дж/м²*К*с; диаметр $d=1$ м; коэффициент теплопроводности атмосферы 0,0259 Дж/м*К*с; коэффициент теплопроводности породы принимается по табличным значениям в зависимости от стадии метаморфизма угля; расстояние с учетом характеристик тепловизора (L , м).

По рассчитанному коэффициенту теплоотдачи в атмосферу с помощью полученных зависимостей (рис. 5.1, табл. 5.2) определяют расстояние дистанционного контроля температуры породных отвалов.

2. В случае значительных размеров породных отвалов, их разбивают на сектора по сторонам света.

3. Первым этапом подготовки к тепловизионной съемке породного отвала является определение коэффициента излучения и определение отраженной кажущейся температуры. Отраженная кажущаяся температура – это кажущаяся температура других объектов, излучение которых, отражаясь от поверхности, попадает в детектор тепловизора (ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013). Определение отраженной кажущейся температуры проводится методом отражателя.

Коэффициент излучения определяется практическим путем, посредством измерения контактным термометром или с использованием образцового материала (ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013).

4. Ракурс дистанционной съемки учитывают в соответствии с законом Ламберта (2.20).

5. Для оценки влияния турбулентности используются поправочные коэффициенты согласно РД 153-34.0-20.364-00 (табл. 2.5).

6. Дистанционный контроль теплового состояния породных отвалов необходимо проводить в утреннее или вечернее время в условиях повышенной облачности, а также в метеорологических условиях, характеризующихся отсутствием осадков. Температурные съемки и отбор проб для анализа не проводят при грозах и ливневых осадках.

При невозможности соблюдения вышеприведенных правил, учитывают коэффициент рассеивания на частицах атмосферы с помощью метеорологической дальности видимости.

7. С применением зависимости температурного контраста между очагом самовозгорания и тепловизором от расстояния съемки, для выбранного расстояния дистанционного контроля определяют температурный контраст (формула 4.1).

8. Используя полученные фиксируемые тепловизором значения энергетической светимости, теплофизические свойства породы и атмосферы и температурный контраст, определяем температуру очага тепловыделения (формула 2.46).

9. При обнаружении скрытых очагов тепловыделения используется принцип сравнения текущей зоны контроля с эталонной (не имеющей очагов тепловыделения) зоной. Эталонная зона выбирается аналогично контролируемой и находится в тех же условиях теплообмена (располагается вблизи исследуемой зоны). Оценка тепловых аномалий производится как по температурному перепаду в зоне аномалии, так и путем сравнения с эталонной зоной.

10. Часть породного отвала, температура поверхности которого превышает температуру эталонной зоны на 5°C или составляет выше 45°C считается очагом самовозгорания. Очаги самовозгорания наносятся на генеральный план породного отвала.

11. На выявленных очагах самовозгорания проводится измерение газового состава выбросов породных отвалов. До проведения отбора проб поверхность породного отвала обследуется, участки породных отвалов, на которых выявлены пустоты, трещины, и участки с рыхлой поверхностью ограждаются, возле них устанавливаются предупредительные знаки.

12. Измерение газового состава проводится с помощью трубы, диаметром 150 мм и высотой 1,5 м, установленной на поверхности отвала на глубину 0,1 м и газоанализатора или индикаторных трубок. Измерения проводятся в соответствии с инструкцией эксплуатации газоанализатора. По степени использования кислорода воздуха и отношению концентраций диоксида углерода к оксиду углерода определяют стадию горения породного массива (табл. 4.8). Выявленные очаги самовозгорания фиксируют на генеральном плане породного отвала.

13. На выявленных очагах самовозгорания проводятся меры по их ликвидации и снижению выбросов загрязняющих веществ в соответствии со стадией окисления.

14. В качестве мероприятия по ликвидации очагов на стадии низкотемпературного окисления или самовозгорания, а также снижению выбросов загрязняющих веществ рекомендуется обработка очагов с использованием раствора глины и извести. Мероприятие рекомендуется выполнять с применением беспилотных летательных аппаратов.

Беспилотный летательный аппарат вертолетного типа (например «Ворон 700») имеет возможность притормаживать в воздухе над очагом самовозгорания и сбрасывать на него изолирующие материалы. Использование БПЛА позволяет оперативно локализовать и ликвидировать очаги самовозгорания на ранней стадии.

5.4 Выводы

1. Обосновано применение мониторинга теплового состояния поверхности всех типов породных отвалов с различным уровнем опасности с периодичностью контроля (1 раз в месяц).

2. Впервые обоснованы и установлены предельные расстояния съемки для углей разной стадии метаморфизма с использованием дистанционных методов.

3. Установлено, что фиксируемый коэффициент теплоотдачи в атмосферу на породных отвалах, образованных при добыче угля высокой стадии метаморфизма, будет выше, чем фиксируемый коэффициент теплоотдачи в атмосферу при измерении очагов самовозгорания на поверхности породных отвалов, которые образованы при добыче угля низкой стадии метаморфизма.

4. Показано, что горение ПО, образованных при добыче углей низкой стадии метаморфизма приводят к более значительным выбросам, чем при горении породных отвалов, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма

5. Обоснована целесообразность использования беспилотных летательных аппаратов для выявления очагов самонагрева на начальной стадии горения породных отвалов. Предложен способ тушения очагов самовозгорания на ранней стадии горения с применением БПЛА вертолетного типа.

6. Разработанные рекомендации по дистанционному контролю теплового состояния породных отвалов позволяют выявлять очаги самовозгорания на ранней стадии горения с учетом предельных расстояний дистанционного контроля и оптической системы тепловизора. С применением величины температурного контраста и учетом внешних факторов воздействия проводится измерение температуры очагов самовозгорания на поверхности породных

отвалов. Применение степени использования кислорода и отношения диоксида углерода и оксиду позволяет определить направление процесса окисления в очаге самовозгорания и принять своевременные меры по его ликвидации.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ ПО РАБОТЕ

1. Теоретически и экспериментально **доказано**, что эффективным способом повышения уровня экологической безопасности породных отвалов горнопромышленных агломераций является дистанционный мониторинг теплового состояния поверхности действующих и не действующих, горящих и не горящих ПО в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов, оснащенных приборами тепловизионной съемки.

2. Влияние теплофизических характеристик породы и атмосферы на отвод тепла от очагов самовозгорания на отвалах горной породы **описано** уравнением в критериальном виде. Адекватность этого уравнения подтверждена результатами натурных исследований.

3. **Обоснованы и установлены** предельные расстояния и периодичность дистанционного мониторинга теплового состояния поверхности ПО для углей разной степени метаморфизма.

4. Экспериментально **установлено**, что выбросы в атмосферу от низкотемпературных зон эрозии на поверхности породных отвалов, занимающие площадь 20-25% поверхности отвала, составляют до 50% от общего вклада в загрязнение по всем загрязняющим веществам.

5. **Установлено**, что увеличение относительной влажности атмосферы сопровождается повышением степени генерации наиболее токсичного компонента газовых выбросов - сероводорода в низкотемпературных зонах на поверхности горящих породных отвалов.

6. **Предложен** метод определения стадии горения породных отвалов по соотношению концентраций диоксида углерода к оксиду углерода и по степени использования кислорода.

7. **Установлено**, что значение критерия Нуссельта от очага самонагревания в атмосферу (Nu_a), характеризующее отвод тепла излучением, пропорционально квадратному корню из критерия Нуссельта, характеризующего отвод тепла к

породе ($Nu_{\text{п}}$) и, соответственно зависит от теплопроводных свойств породы и атмосферы.

8. **Проанализирован** механизм развития самовозгорания ПО и обоснована необходимость предотвращения выбросов загрязняющих веществ на ранней стадии горения отвалов.

9. Теоретически **обосновано и подтверждено** лабораторными и натурными исследованиями влияние расстояния, ракурса съемки и формы очагов самовозгорания на фиксируемую энергетическую светимость и температурный контраст при дистанционных методах контроля.

10. Результаты диссертационного исследования включены в Программу экологической безопасности ДНР, в Программу развития ОП «Шахта имени С.М. Кирова» ГП «Макеевуголь», в методику НИИГД «Респиратор» о контроле теплового состояния породных отвалов. Основные научные разработки автора используются в учебном процессе ГОУ ВПО «ДонНТУ» для студентов направлений 20.03.01 «Техносферная безопасность», 05.03.06 «Экология и природопользование».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубова, Л. Г.** Терриконы: монография [Текст] / Л. Г. Зубова, А.Р. Зубов, А.А. Зубов, А.В. Харламова, С.Г. Воробьев, Ю.И. Макаришина, В.В. Буняченко.- Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2015. – 712 с.
2. **Саранчук, В.И.** Борьба с горением породных отвалов [Текст] / В.И. Саранчук. — Киев.: Наукова думка, 1978. - 162 с.
3. **Дрозд, Г.Я.** Потенциал развития сектора обращения с отходами на примере Луганской Народной Республики / Г.Я. Дрозд// Экологический Вестник России. Москва. - №9. 2017. – С 45-50.
4. **Смирный, М.Ф.** Экологическая безопасность терриконовых ландшафтов Донбасса [Текст] / М.Ф.Смирный, Л.Г.Зубова, О.Р.Зубов .- Монография. – Луганск: Изд. ВНУ им. Даля, 2006. – 232 с.
5. **Stracher, G.** Coal and peat fires: a global perspective. Volume 1: Coal - Geology and Combustion [Текст] / Glenn B. Stracher, Anumpa Prakash, Ellina V. Sokol. - Elsevier Science. 2010. - 380 с.
6. **Lloyd, P.J.** Coal mining and the environment. In Proceedings of the International Conference on Coal and Environment [Текст] / P.J. Lloyd // International Bar Association (IBA). - 2002. – С. 8-9.
7. **Зубов, А.Р.** Повышение экологической безопасности породных отвалов угольных шахт: монография [Текст] / А.Р. Зубов, Л.Г. Зубова, С.Г. Воробьев, А.А. Зубов, А.В. Харламова. – Луганск: изд. ВНУ им. В. Даля, 2012.-172 с.
8. **Finkelman, Robert B.** Potential health impacts of burning coal beds and waste banks [Текст] / Robert B. Finkelman// International Journal of Coal Geology.- 2004. - № 59.- PP. 19– 24.

9. Глухова, Е.И. Влияние продуктов горения породных отвалов на состояние здоровья населения [Текст] / Е.И. Глухова, А.Б. Ермаченко // Гігієна населених місць. – Донецк: ДУ ІГМЕ. - 2011. – № 58. - С. 344-347.

10. Панов, Б.С. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса [Текст] / Б.С. Панов, Ю.А. Проскурня // Межвузовский научный тематический сборник «Геология угольных месторождений». – Екатеринбург. - 2002. – С. 274–281.

11. Скорик, В. Г. Опыт озеленения террикоников угольных шахт Донбасса [Текст]: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук.- К.: УСХА, 1976.- 29 с.

12. Горєв, Л.М. Основи моделювання в гідроекології [Текст] / Л.М. Горєв. - Либідь, 1996.-335 с.

13. Никаноров, А.М. Гидрохимия [Текст] / А.М. Никаноров, Е.В. Посохов - Л.: Гидрометеиздат, 1985.-232 с.

14. Копылов, А.Б. Мониторинг экологических последствий закрытия шахт Кузбасса / А.Б. Копылов, Т.В. Корчагина, Н.В. Ефимова, К.А. Головин // Известия Тульского государственного университета, серия: «Науки о Земле», выпуск 3, Тула, 2017 г. – С. 58 – 65.

15. Проскурня, Ю.А. Мінералогія відвалів вугільних шахт Донбасу (на прикладі Донецько-Макіївського промислового району) [Текст]: Автореф. дис. ... канд. геол. Наук: 04.00.20 / Крив. Техн. Університет. – Кривий Ріг, 2000. – 19 с.

16. Зубова, Л.Г. Воздействие горнодобывающей промышленности на естественные ландшафты Донбасса [Текст] / Л.Г. Зубова, В.А. Гречка, Ю.В. Матюшенко // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 1999.- № 4.- С. 63 – 66.

17. Наумов, Б.Е. Самовозгорание органических и минеральных веществ и обеспечение пожаробезопасности горных пород [Текст]/ Б.Е. Наумов // Проблемы производственного травматизма и условий труда. – Санкт-Петербург: МАНЭБ, МОТ ООН. 2006. - С. 122-129.

18. Kaymakci, E. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters [Текст] / E. Kaymakci, V. Didari // Turk. J. Eng. Environ. Sci. 26 (2002).- PP. 59–64.

19. Panigrahi, D.C. Classification of coal seams with respect to their spontaneous heating susceptibility– a neural network approach [Текст] / D.C. Panigrahi, H.B. Sahu //Geotech. Geol. Eng. 22. – 2004. - PP. 457–476.

20. Banerjee, S. C. A theoretical design to the determination of risk index of spontaneous fires in coal mines [Текст] / S.C. Banerjee //J. Mines, Met. Fuels.-1982. - PP. 399–406.

21. Materazzi, S. Evolved gas analysis by infrared spectroscopy [Текст] / S. Materazzi, S. Vecchio // Appl. Spectrosc. Rev. - № 45. - 2010.- PP. 241–273.

22. Греков, С.П. Параметры теплообмена при очаговом нагревании насыпи шахтной породы [Текст] / С.П. Греков, О.П. Орликова, О.П. Пашковский // Научный вестник НИИГД «Респиратор». - 2018. - Выпуск 1(55). - С. 33-46.

23. Голынская, Ф.А. Концептуальные положения о геологических факторах самовозгорания углей [Текст] / Ф.А. Голынская // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. -№. 1- С. 35-39.

24. Walker, S. Uncontrolled fires in coal and coal wastes [Текст] / S. Walker // International Energy Agency (IEA). - London, United Kingdom. – 1999. – 208 p.

25. Ун, Ли Хи. О петрографическом методе определения сорбционной способности углей [Электронный ресурс] / Ли Хи Ун, И. Д. Машенко, Л. П. Белавенцев, П. А. Шлапаков // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности.-[2012] №1. г. Кемерово - С. 31-44.- Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-petrograficheskom-metode-opredeleniya-sorbtsionnoy-sposobnosti-ugley> (дата обращения: 24.08.2018).

26. Lohrer, C. Influence of Environmental Parameters on the Self-Ignition Behavior of Coal / Christian Lohrer, Martin Schmidt, Ulrich Krause // Spontaneous

Coal Seam Fires: Mitigating a Global Disaster/ UNESCO Office Beijing. – 2005.- PP. 210-233.

27. Wang, D. Changes in active functional groups during low-temperature oxidation of coal [Текст] / D. Wang, X. Zhong, X. Qi // Min. Sci. Technol. (China). - №20. – 2010. - PP. 35–40.

28. Iglesias, M.J. Compositional and structural changes during aerial oxidation of coal and their relations with technological properties [Текст] / M.J. Iglesias, G. Puente, E. Fuente, J.J. Pis // Vib. Spectro. -№ 17. – 1998. - PP. 41–52.

29. Low, M.J.D. An approach to the study of minerals using infrared photothermal beam deflection spectroscopy [Текст] / M.J.D. Low, J.M.D. Tascon // Phys. Chem. Miner.-№ 12. – 1985. - PP. 19–22.

30. Querol, X. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan [Текст] /X. Querol, M. Izquierdo, E. Monfort, E. Alvarez, O. Font, T. Moreno, A. Alastuey, X. Zhuang, W. Lud, Y.Wang // International Journal of Coal Geology. - Shanxi Province. - 2008.-№ 75 - PP. 93–104.

31. McPherson, M.J. Subsurface Ventilation and Environmental Engineering [Текст] / M.J. McPherson // University Press, Cambridge. - 1993.- 905 p.

32. Beamish, B.B. Effect of moisture content on the R70 self-heating rate of Callide coal [Текст] / B.B. Beamish, G.R. Hamilton // Int. J. Coal Geol. - № 64. – 2005. - 155 – 160 PP.

33. Bhattacharyya, K.K. The influence of humidity on the initial stages of the spontaneous heating of coal [Текст] / K.K. Bhattacharyya, D.J. Hodges, F.B. Hinsley // Min. Eng. -№ 126. – 1968. - PP. 274–284.

34. Hodges, D.J. The influence of moisture on the spontaneous heating of coal [Текст] / D.J. Hodges and F.B. Hinsley // Min. Eng. №123.- 1964.- PP. 211–224.

35. Брагина, П.С. Самовозгорание угольных отвалов в Кемеровской области [Текст] / П.С. Брагина // Вестник Кузбасской государственной педагогической академии. - Новокузнецк, 2013. - С 57-64.

36. Fierro, V. Model predictions and experimental results on self-heating prevention of stockpiled coals [Текст] / V. Fierro, J.L. Miranda, C. Romero, J.M. Andrés, A.Arriaga, D. Schmal // Fuel. № 80. - 2001. - С. 125-134.

37. Зияддин Кзы Калаева, Сахиба. Породные отвалы угольных шахт России [Текст] / Калаева Сахиба Зияддин Кзы, С.М. Богданов, Н.О, Лукин, А.А. Огер // Известия Тульского государственного университета/ Науки о земле. – 2016. - № 1- С. - 3-23.

38. Греков, С.П. Особенности низкотемпературного окисления углей и их пожароопасность [Текст] / С.П. Греков, А.А. Всякий, В.П. Орликова // Уголь Украины, 2015. - С. 51-54.

39. Schmal, D. Spontaneous heating of stored coal [Текст] / D.Schmal // Chemistry of coal weathering. Amsterdam Elsevier.In Nelson, C.R. (Ed.), 1989. – PP. 133-215.

40. Rosema, A. Manual of coal fire detection and monitoring. Netherlands Institute of Applied Geosciences (TNO) [Текст] / A. Rosema, H.Y. Guan, H. Veld, Z. Vekerdy, A.M. Ten Katen, A. Prakash Utrecht, Netherlands.1999.- 258 с.

41. Schmal, D. A model for the spontaneous heating of stored coal [Текст] / **D.Schmal**; PhD thesis, Delft University of Technology. - Delft, Netherlands, 1987. – 150 p.

42. Deng, J. Effects of pyrite on the spontaneous combustion of coal [Текст] / J. Deng, X. Ma, Y. Zhang, Y. Li, W. Zhu // Int. J. Coal Sci. Technol.- № 2.- 2015.- PP. 306–311.

43. Зборщик, М.П. Горение пород угольных месторождений и их тушение [Текст] / - Донецк: ДонГТУ, 2000. - 180 с.

44. Гамов, М. И. Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт Восточного Донбасса [Электронный ресурс] / М. И. Гамов, И. В. Гордеев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. [2017. №2 (194)].- С. 92-100.- Режим доступа: URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-factory-i-ekologicheskie-posledstviya-samovozgoraniya-otvalov-ugolnyh-shaht-vostochnogo-donbassa> (дата обращения: 24.08.2018).

45. Греков, С.П. Определение температуры самонагрева угля по соотношению оксида углерода и убыли кислорода на аварийном участке [Электронный ресурс] / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // CNBOP-PIBBezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. [2015]. - РР. 119-127. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-temperatury-samonagrevaniya-uglya-po-sootnosheniyu-okside-ugleroda-i-ubyli-kisloroda-na-avariynom-uchastke> (дата обращения: 24.08.2018).

46. Пашковский, П.С. Развитие процесса низкотемпературного окисления углей. [Текст] / П.С. Пашковский, С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Научный вестник НИИГД «Респиратор».- 2001. - № 52. - С. 153-167.

47. Пашковский, П.С. Математическая модель самонагрева твёрдых дисперсных органических веществ [Текст] / П.С. Пашковский, И.Н. Зинченко, К.В. Глушенко, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. - № 3 (54). - С. 48-57.

48. Греков, С.П. Контроль за признаками самонагрева угля [Текст] / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2015. - С 40-43

49. Греков, С.П. Математическое моделирование формирования полей температур при самонагревании органических веществ [Текст] /С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова, К.В. Глушенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». - 2016 .- № 3 (53). - С. 36-46.

50. Греков, С.П. Определение температуры очага самонагрева угля и времени его зарождения по концентрации пожарных газов [Текст] / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Науковий вісник УкрНДІПБ. - 2015. - № 1 (31). - С. 62-72.

51. Игишев, В.Г. Выделение индикаторных пожарных газов при окислении угля на стадиях самонагревания и беспламенного горения [Текст] / В.Г. Игишев, П.А. Шлапаков, С.А. Хаймин, С.А. Син // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. -2015.- № 4. - С. 55-59.

52. Греков, С.П. Расчет коэффициентов теплоотдачи в слое зернистого вещества [Текст] / С.П. Греков, И.Г. Старикова, К.В. Глушенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. - № 2(54). - С. 59-68.

53. Греков, С.П. Параметры теплообмена при очаговом нагетвании насыпи шахтной породы [Текст] / С.П. Греков, В.П. Орликова, О.П. Пашковский // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2018. - № 1(55). - С. 33-46.

54. Пашковский, О.П. Новый метод определения склонности углей к самовозгоранию [Текст] / П.С. Пашковский, П. Греков, Б.И. Кошовский, А.М. Луганский // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2012. - № 49. - С. 61-72.

55. Греков, С.П. Метод определения склонности углей к самовозгоранию [Текст] / С.П. Греков, П.С. Пашковский, Е.Л. Завьялова, А.А. Всякий // Горноспасательное дело: сб. науч. тр./ НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2011. – Вып. 48. – С.64-73.

56. Пашковский, П.С. Развитие процесса низкотемпературного окисления углей [Текст] / П.С. Пашковский, С. П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий. // Научный вестник/ НИИГД «Респиратор». - 2015. - № 5. - С. 153-167.

57. Пашковский, П.С. Универсальный комплексный показатель эндогенной пожароопасности [Текст] / Греков С.П., Пашковский П.С., Всякий А.А. //Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza.- vol. 44.- 2016. – С. 89-97.

58. НПАОП 10.0-5.21-04. Інструкція із запобігання самозапалюванню, гасіння та розбирання породних відвалів. наказ Держнаглядохоронпраці України від 26.10.2004 № 236. - 12 с.

59. Инструкция по предупреждению самовозгорания, тушению и разборке породных отвалов [Текст]. - Серия 05. Выпуск 27. – М.: Закрытое

акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 40 с.

60. Козир, Д.О. Аналіз впливу зовнішніх факторів на результати температурного контролю теплового стану породних відвалів [Текст] / Д.О. Козир // Проблеми екології: Загальнодержавний науково-технічний журнал. - Донецьк: ДВНЗ „ДонНТУ”. - 2013. - № 2 (32). – С.69 – 75.

61. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В.П. Вавилов. Москва.:ИД. Спектр. – 2009. - 544 с.

62. Козырь, Д.А. Мониторинг теплового состояния породных отвалов с использованием дистанционных методов контроля [Текст] / Д.А. Козырь, С.П. Высоцкий // Вестник Академии гражданской защиты: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР. - 2018. – Вып.1 (13). – С. 59-69

63. Committee on Coal Waste Impoundments, Committee on Earth Resources, Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies National Research Council [Текст] / Coal Waste Impoundments Risks, Responses, and Alternatives. Report 2002. NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington., 2002. - 230 p.

64. Kessels, W. Coal Fires Between Self-Ignition and Fire Fighting: Numerical Modeling and Basic Geophysical Measurements. [Текст] / Winfried Kessels, Manfred W. Wuttke, Stefan Wessling [etc.] // Spontaneous Coal Seam Fires: Mitigating a Global Disaster/ UNESCO Office Beijing 2008. - PP. 467–484.

65. Wang, Yun-jia. Infrared thermography monitoring and early warning of the spontaneous combustion of coal gangue pile [Текст] / Yun-jia Wang, Yao-bin Sheng, Gu Qiang, [etc.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences vol. XXXVII. Part B8. Beijing. - 2008. - PP. 203–206.

66. Wasilewski, S. Mining waste dumps – modern monitoring of thermal and gas activities [Текст] / S. Wasilewski, P. Skotniczny // *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. - 2015.-31(1). - С. 155–182.

67. Kuenzer, C. Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: investigating two arid mining regions in north-central China [Текст] / C. Kuenzer, J. Zhang, A. Tetzlaff [etc.] // *Appl. Geogr.* – 27. – 2007. - PP. 42–62.

68. Gerlinde, Sch. Geophysical Investigation of Wuda Coal Mining Area, Inner Mongolia: Electromagnetics and Magnetism for Coal Fire Detection / Schaumann Gerlinde, Siemon Bernhard, Changchun Yu // *Spontaneous Coal Seam Fires: Mitigating a Global Disaster/ UNESCO Office Beijing*. – 2005.- PP. 336-351.

69. Sternberg, R. Magnetic surveys over clinkers and coal seam fires in Western North Dakota. Presentation at the Denver Annual Meeting of the Geological Society of America [Текст] / R. Sternberg, C. Lippincott // *Denver, Colorado*. - U.S.A. - 2004.- С. 7-10.

70. Zhang, J. Expert knowledge fusion for hazard reduction in the development of a Dynamic Analysis System for Fire Fighting. [Текст] / J. Zhang, Z. Vekerdy, J.L. van Genderen, F. Wang, H. Veld, B. Cui. // *Proc. Dynamic and Multi-Dimensional GIS Conference*. - Beijing, China. - 1999. – С. 4-6.

71. Zhang, X. Spatial analysis of thermal anomalies from airborne multispectral data [Текст] / X. Zhang, J.L. van Genderen, S.B. Kroonenberg // *International Journal of Remote Sensing* . -2003.- №. 24 - PP. 1-17.

72. Kuenzer, C. Multitemporal coal fire dynamics - combining thermal remote sensing analysis and temperature field mappings to assess coal fire development in Wuda coal mining area. [Текст] / C. Kuenzer, J. Zhang, A. Hirner// *ISPMSRS*. - Beijing, China. -2005. - PP. 17-27.

73. Твердов, А. А. Профилактика и ликвидация горения породных отвалов [Текст] /А. А. Твердов, А. Б. Яновский, С. Б. Никишичев // “УГОЛЬ”. – Москва.- 2010. - С. 3 - 7.

74. Козырь, Д.А. Анализ влияния внешних факторов на результаты тепловизионного контроля очагов горения на породных отвалах [Текст] / Д.А. Козырь, В.К. Костенко, Е.Л. Завьялова, Б.Б. Бандурян // Науковий вісник УкрНДІПБ. -2013. - № 2 (28). - С. 194-203.

75. Ion, T. New researches in diminishing selfheating self-combustion phenomenon in the Jiu Valley, Romania coal mines by use of inorganic inhibitors. [Текст] / T. Ion, C. Gilgor, D. Cioclea, L. Jurca // In Proceedings of the 27th International Conference of Safety in Mines. - New Delhi, India. - 20-22 February. – 1997. – PP. 555-558.

76. Attalla, M. NO_x Emissions from Blasting Operations in Open Cut Coal Mining in the Hunter Valley [Текст] / Moetaz Attalla, Stuart J. Day, Tony Lange, William Lilley, Scott Morgan// CSIRO Energy Technology. – 2008.- PP. 7874-7883.

77. Chevrier, R. M. Prélèvement et analyses des condensats de fumerolles sur volcans actifs [Текст] / R. M. Chevrier , F. Le Guern // Soufrière de la Guadeloupe et Pouzzoles et Vulcano / Bulletin of Volcanology. – Italie.-1978. - 45(3). – PP. 173–178.

78. Чесноков, Б.В. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение восьмое) [Текст] / Б.В. Чесноков, А.Ф. Бушмакин // Уральский минералогический сборник.- № 5. М.- ас: ИМин УрО РАН. - 1995. - С. 3-22.

79. Pone, J. Denis N. Environmental and Health Impacts of Burning Coal in Witbank Coalfield, South Africa / J. Denis N. Pone, Kim A.A. Hein, Glenn B. Stracher, Robert B. Finkelman, and Harold J. Annegarn Potential // Spontaneous Coal Seam Fires: Mitigating a Global Disaster/ UNESCO Office Beijing. – 2005.- PP. 94-103.

80. Carras, John N. Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia [Текст] / John N. Carras, Stuart J. Day, Abou Saghafi, David J. Williams // International Journal of Coal Geology. – 78. – 2009. – PP. 161–168.

81. Misz-Kennan, M. Thermal transformation of organic matter in coal waste from Rymer Cones (Upper Silesian Coal Basin, Poland) [Текст] / Magdalena Misz-Kennan, Monika Fabiańska // International Journal of Coal Geology. – 2010. – 81. – PP. 343–358.

82. Nasalehdani, M. N. Condensate minerals from a burning coal-waste heap in Avion, northern FRANCE [Текст] / M. Naze-Nancy Nasalehdani, Florias Mees, Michel Dubois, Yvan Coquinot, Jean-Luc Potdevin // The Canadian Mineralogist № 47. -2009. - PP. 865-884.

83. Девятова, А. Ю. Газо-аэрозольные выбросы при горении угольных отвалов [Текст] / А. Ю. Девятова // Интерэкспо Гео-Сибирь, vol. 2. - №. 3. – 2013. - С. 147-152.

84. Девятова, А. Ю. Газоаэрозольный перенос элементов из хвостохранилища комсомольского золотоизвлекательного завода (кемеровская область) [Текст] / А. Ю. Девятова, С. Б. Бортникова // Интерэкспо гео-сибирь институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. – С. 152-156.

85. Момот, Д.И. Влияние породных отвалов на окружающую среду [Текст] / Д.И. Момот, В.П. Орликова, О.П. Пашковский. // Научный вестник НИИГД «Респиратор». - № 3(55). – 2018. - С. 110-118.

86. Пашковский, О.П. Прогноз выбросов вредных веществ с породных отвалов [Текст] / О.П. Пашковский // Вестник ДонНАСА. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. - Выпуск 3(119).- 2016. - С. 207-210.

87. Sinha, A. Spontaneous Coal Seam Fires: A Global Phenomenon [Текст] / A. Sinha, V.K. Singh// Spontaneous Coal Seam Fires: Mitigating a Global Disaster/ UNESCO Offie Beijing. – 2005.- PP. 41-66.

88. Prakash, A. Estimating the depth of buried hot features from thermal IR remote sensing data [Текст] / A. Prakash, R.G.S. Sastry, R.P. Gupta, A.K. Saraf // A

conceptual approach. International Journal of Remote Sensing. - 1995. - №16 (13). - PP. 2503-2510.

89. УДК 504.064.38 «Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами» [Текст] - СССР.: Государственный Комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. – 1986.- 142 с.

90. СОУ-П 10.1-00174102.007:2008 «Выбросы вредных веществ из породных отвалов. Методика расчета» [Текст]. – Введ.год .- разработанная НИИ Респиратор. – 2008.- 50 с.

91. Рожков, В.Ф. Совершенствование методики прогноза загрязнения атмосферы породными отвалами и поверхностными технологическими комплексами угольных шахт [Текст]: Автореферат диссертации кандидата технических наук : 11.00.11/ В.Ф. Рожков. –Тула. – 1997. - 22 с.

92. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника применение пер. с франц [Текст] / Ж. Госсорг. - М.: Мир, 1988. - 416 с.

93. Сушкевич, Т.А. Математические модели переноса излучения [Текст] / Т.А. Сушкевич. - Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2006.- 661 с.

94. Krier, A., Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics. Spriger. [Текст] / A. Krier. – London, 2006. - 379 p.

95. Брамсон, М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел [Текст] / М.А. Брамсон. – Москва: Наука, 1964. – 227 с.

96. Вавилов, В.П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике [Текст] / В.П. Вавилов, А.Н. Александров. - Москва: «Энергопрогресс», 2003. - 76 с.

97. Хадсон, Р. Инфракрасные системы [Текст] / Р. Хадсон. - Москва.: МИР, 1972. - 537 с.

98. Круз, П. Основы инфракрасной техники [Текст] / П. Круз, Л. Макголоулин, Р. Макквистан. – Москва.: Минобороны СССР, 1964. - 466 с.

99. Тарасов, В.В. Инфракрасные системы смотрящего типа [Текст] / В. В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – Москва: Логос, 2004. - 444 с.

100. Зуев, В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) [Текст] / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. - Москва: Советское Радио, 1987. - 368 с.

101. Иванов, В.П. Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. Казань [Текст] / В.П. Иванов - Новое знание, 2000. - 357 с.

102. Ллойд, Дж. Системы тепловидения: Пер.с англ./ Под ред. Горячева А.И) [Текст] / Дж. Ллойд - М.: Мир, 1976.-742 с.

103. Austin, D.E. Use of NSWCDD weather database for prediction of atmospheric transmission in common thermal imaging sensor bands [Текст] / D.E. Austin, K.C. Hepfer, W.R. Rudzinsky // Naval surface warfare center report. – Dahgren VA, 1995.- 89 p.

104. Accetta, J.S. Infrared and electro-optical systems handbook [Текст] / J.S. Accetta, D. L. Shumaker; Infrared Information Analysis Center. – Bellingham, 1993. - 3024 p.

105. Макаров, А.С. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем [Текст] / А.С. Макаров, А.И. Омелаев, В.Л. Филипов. - Казань: Унипресс, 1998.- 318 с.

106. Гобрей, Р. Диагностирование электрооборудования 0,4—750 кВ средствами инфракрасной техники [Текст] / Р. Гобрей, В. Чернов, Є. Удод. - К.: "КВІЦ", 2007. - 374 с.

107. Татарский, В.И. Распространение волн в турбулентной среде [Текст] / В.И. Татарский. – Москва.: Наука, 1967. - 548 с.

108. Винниченко, Н. К. Турбулентность в свободной атмосфере [Текст] / Н. К. Винниченко, Н. Пинус, С. М .Шметер, Г.Шур. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. - 286 с.

109. Kopeika, N.S. Prediction of image quality through atmosphere: the dependence of atmospheric modulation transfer function on weather [Текст] /N.S. Kopeika, I.Kogan, R. Israeli, I.Dinstein // Opt.eng. – 1990. - №2 - PP. 1427-1437.

110. РД 153-34.0-20.364-00. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования [Текст].: РАО «ЕЭС РОССИИ», 2000, - 50 с.

111. Криксунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. [Текст] / Л.З. Криксунов . - Москва, 1978.- 400 с.

112. Формозов, Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах [Текст] / Б. Н. Формозов: Учеб. пособие СПбГУАП. - СПб, 2002. - 120 с.

113. Peoples, Jerry, A. THERMAL CONTROL OF HIGH ENERGY NUCLEAR WASTE, SPACE OPTION (NASA) [Текст] / A. Jerry Peoples – Alabama, 1979. - 45 p.

114. Джемисон, Дж. Э. Физика и техника инфракрасного излучения [Текст] / Дж. Э. Джемисон, Р.Х. Мак-Фи, Дж. Н. Пласс, Б. Г. Грубе, Р. Дж. Ричардс. - Москва, 1965. - 646 с.

115. Лыков, А.В. Теория тепло и массопереноса [Текст] / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Москва, 1963. – 538 с.

116. Высоцкий, С.П. Дистанционный контроль теплового состояния породных отвалов [Текст] / С.П. Высоцкий, Д.А. Козырь// Научный вестник НИИГД «Респиратор», научно-технический журнал. - Донецк, 2018.- №3(55). – С. 84-90.

117. Высоцкий, С.П. Контроль экологического состояния породных отвалов [Текст] / С.П. Высоцкий, Д.А. Козырь // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – Макеевка: ДонНАСА, 2018. – Вып. 2018-3 (131). – С. 12-18.

118. ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. [Текст]. - Термография. - Москва.: Стандартинформ, 2013, - 39 с.

- 119. ГОСТ Р 8.619-2006.** Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. [Текст].- Москва.: Стандартинформ, 2006, - 19 с.
- 120. ГОСТР 56511 2015.** Контроль неразрушающий методы теплового вида. Общие требования. [Текст]. Москва.: Стандартинформ, 2015, - 12 с.
- 121. РД 153-34.0-20.363-9.** Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и вл.[Текст].: РАО «ЕЭС РОССИИ», 2000, - 136 с.
- 122. Козир, Д.О.** Аналіз впливу зовнішніх факторів на результати температурного контролю теплового стану породних відвалів [Текст] / Д.О. Козир // Проблеми екології: Загальнодержавний науково-технічний журнал. - Донецьк: ДВНЗ „ДонНТУ”, 2013. - № 2 (32). – С. 69 – 75.
- 123. Зубова, Л.Г.** Основы математической обработки экспериментальных данных: учебное пособие / Л.Г. Зубова. – Луганск: «Ноулидж», 2013, 60 с.
- 124. Козырь, Д.А.** Оценка влияния ракурса съемки на результаты тепловизионной съемки очагов горения на породных отвалах [Текст] /Д.А. Козырь// Труды Второго международного научно-практического семинара «Повховские научные чтения»/Под общ.ред. Ступина А.Б. - Донецк: ДонНУ, 2012.- С. 50-53.
- 125. Козырь, Д.А.** Влияние ракурса съемки на результаты тепловизионной съемки очагов горения на породных отвалах [Текст] / Д.А. Козырь//Вентиляція підземних споруд та промислова безпека в ХХІ столітті. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції-Донецьк: ДонНТУ. - 2012. - С. 100-103.
- 126. Козырь, Д.А.** Влияние геометрических параметров очага самовозгорания на результаты дистанционного контроля температуры породных отвалов. [Текст] / Д.А. Козырь // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сборник материалов XII Международной

конференции аспирантов и студентов / ДОННТУ, ДонНУ. – Донецк: ГОУ ВПО «ДОННТУ», 2018. – С.153-155

127. Козырь, Д.А. Обоснование методики дистанционного измерения температуры поверхности источников горения и самонагрева на породных отвалах угольных шахт [Текст] / Д.А. Козырь // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. - С. 49-58.

128. Козир, Д.О. Удосконалення методики дистанційної теплової зйомки породних відвалів вугільних шахт [Текст] /Д. О. Козир, В. К. Костенко, Є. В. Качкар, А. О. Майборода//Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. // Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. - 2015.– С. 75-79.

129. Козырь, Д.А. Обоснование методики дистанционного температурного контроля поверхности источников горения и самонагрева на породных отвалах угольных шахт [Текст] / Д. А. Козырь// Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: 2-я Международная научно-техническая интернет-конференция / под общей редакцией И.А. Басовой: сборник научных трудов. Тула: Изд-во ТулГУ. - 2017. - С. 302-308.

130. Козырь, Д.А. Усовершенствование методов контроля температуры при обеспечении экологической безопасности породных отвалов угольных предприятий [Текст] / Д.А. Козырь // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях: Материалы VII Междунар. науч. конф. 24-26 октября 2017 г. – Белгород: Изд-во «ПОЛИТЕРРА». - 2017. – С. 339 – 342.

131. ГОСТ 26629-85. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций [Текст].: Москва. 1985. - 13 с.

132. Методические указания по проведению тепловизионного контроля строительных сооружений. [Текст]. Смоленск.: ООО «Энергосервисная компания ЗЭ-С», 2006, - 22 с.

133. Зеньков, И.В. Исследование и оценка влияния водной эрозии на рельеф породных отвалов разреза «Бородинский» [Текст] / И.В. Зеньков –М.: Уголь, 2013.- 280 с.

134. Козырь, Д.А. Процессы окисления в зонах эрозии отвалов угольных шахт [Текст] / Д.А. Козырь, В.К. Костенко// Збірник праць Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми екологічної безпеки». - Кременчук: КрНУ. - 2014. - С. 60-62.

135. Козир, Д.О. Процеси ерозії в зонах окислення відвалів вугільних шахт [Текст] /Д.А. Козырь, В.К. Костенко // Екологія людини. Збірник матеріалів VIII-ої науково-теоретичної конференції. – Житомир. - 2014 року. Том 1. - С. 47-49.

136. Козир, Д.О. Процеси окислення в зонах ерозії відвалів вугільних шахт [Текст] / Д.А. Козырь, В.К. Костенко//Екологічні проблеми топливно - енергетичного комплексу. Збірник наукових праць студентів і аспірантів «Екологічні проблеми топливно - енергетичного комплексу». - Донецьк. -2014. - С. 100-106.

137. Козырь, Д.А. Процессы окисления в зонах эрозии породных отвалов [Текст] / Д. А. Козырь // Проблемы социально-экономической географии и природопользования : сборник трудов Всероссийской научной конференции / Южный федеральный университет.–Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета. - 2017.– С. 198 - 201.

138. Высоцкий, С. П. Исследование процессов генерации выбросов токсичных газов на породных отвалах [Текст] / С. П. Высоцкий, Д. А. Козырь // Вестник Академии гражданской защиты: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2018. – Вып. 3 (15). – С. 68 – 74.

139. Козырь, Д.А. Обоснование методики теплового неразрушающего контроля поверхности источников горения и самонагрева на породных отвалах угольных шахт [Текст] /Д. О. Козир, В. К. Костенко// Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть 2 / Санкт-петербургский горный университет. СПб. - 2016. - С. 104-106.

140. Козырь, Д.А. Обоснование методики теплового неразрушающего контроля промышленных отходов угольных шахт [Текст] /Д. А. Козырь // Экологическая ситуация в Донбассе: проблемы безопасности и рекультивации повреждённых территорий для их экономического возрождения: Доклады Международной научно-практической конференции. 12-13 февраля 2016 года. Научное издание. – Москва, Донецк: Изд-во МНЭПУ. - 2016.- С.72-74.

141. Кураков, Ю.А. Газогенераторный процесс в горящих терриконах и его влияние на экологию [Текст] / Ю.А. Кураков, А.М. Безуглов, В.М. Беленченко// Горный информационно-аналитический бюллетень. - Москва. – 2005. - С. 238-239.

142. Захаров, Е.И. Физико-химические свойства углей и угольных массивов [Текст] / Е.И. Захаров, Н.М. Качурин, И.И. Мохначук // Промышленная безопасность. – ТулГУ. – 2012. - С. 58-67.

143. Lazarevic, D. A. In-situ removal of hydrogen sulphide from landfill gas - arising from the interaction between municipal solid waste and sulphide mine environments within bioreactor conditions [Текст] / David Andrew Lazarevic; Master of Science Thesis. – Stockholm. 2007. – 87 p.

144. Греков, С.П. Определение склонности углей к самовозгоранию [Текст] / С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий //Горноспасательное дело. – 2014. – Вып. 51. - С. 88-100.

145. Орликова, В.П. Самовозгорание угля в местах складирования на поверхности [Текст] / В.П.Орликова, Е.А.Головченко// Научный вестник НИИГД «Респиратор»:науч.техн.журн. –Донецк. - 2017. -№2(54). –С. 31-38.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты и справки о внедрении результатов диссертационной работы:

- Акт внедрения в Программу экологической безопасности на территории Донецкой Народной Республики.
- Акт внедрения в Программу развития ОП «Шахта имени С.М. Кирова» ГП «Макеевуголь».
- Акт внедрения в методику контроля теплового состояния породных отвалов, разработанную НИИГД «Респиратор».
- Акт внедрения в научно-исследовательский процесс ГОУ ВПО «ДонНТУ».
- Акт внедрения в учебный процесс ГОУ ВПО «ДонНТУ» для студентов направлений 20.03.01 «Техносферная безопасность», 05.03.06 «Экология и природопользование».

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты лабораторных исследований:

- Результаты исследований при ракурсе 90^0 .
- Результаты исследований при ракурсе 45^0 .
- Результаты исследований при ракурсе 60^0 .
- Результаты исследований при ракурсе 30^0 .

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты натурных исследований:

- ПО шахты «Октябрьский рудник».
- ПО шахты им. М.И. Калинина.
- ПО шахт им. В. И. Ленина, С.М. Кирова и 13-я бис.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Результаты исследований выбросов при горении породного отвала ш. им. М.И. Калинина.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Свидетельство об аттестации лаборатории.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ И СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКЕ
И ПРИРОДНЫМ РЕСУРСАМ ПРИ ГЛАВЕ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
(ГОСКОМЭКОПОЛИТИКИ ПРИ ГЛАВЕ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ)

пр. Мира, 2Б, г. Донецк, ДНР, 83050, тел./факс (062) 311-03-75
e-mail: office@gkecopoldnr.ru Идентификационный код 51018995

АКТ

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Козыря Дмитрия Александровича на тему: «Совершенствование систем
мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием
дистанционных методов», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 05.23.19 - экологическая
безопасность строительства и городского хозяйства.

Данный акт составлен о включении результатов диссертационных исследований Козыря Дмитрия Александровича на тему «Совершенствование систем мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием дистанционных методов» в Программу по экологической безопасности на территории Донецкой Народной Республики.

Государственным комитетом по экологической политике и природным ресурсам при Главе Донецкой Народной Республики рассмотрены результаты диссертационных исследований Козыря Дмитрия Александровича на тему «Совершенствование систем мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием дистанционных методов».

Учитывая, сложившиеся особенности расположения породных отвалов, в том числе и горящих, в черте горнопромышленных агломераций и их негативное воздействие на атмосферный воздух, проведенные исследования по совершенствованию систем мониторинга позволят обеспечить выполнение требований экологической безопасности и улучшить состояние атмосферного воздуха.

В материалах диссертационного исследования обоснована целесообразность использования беспилотных летательных аппаратов для выявления очагов самовозгорания на ранней стадии горения породных отвалов с оптимальной периодичностью (1 раз/месяц), предложен метод тушения

летательных аппаратов вертолетного типа.

Своевременный мониторинг позволит выполнять мероприятия по предотвращению самовозгорания очагов на породном отвале и снизит выбросы в атмосферный воздух, что улучшит экологическую обстановку в горнопромышленных агломерациях. С развитием пожара расход средств на его тушение значительно увеличивается, важным является своевременно выявить, локализовать и ликвидировать пожар.

Проведенные лабораторные и экспериментальные исследования, а также разработанное критериальное уравнение, которое учитывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах, позволят локализовать очаги самовозгорания на ранней стадии горения с использованием дистанционных методов.

Сопоставление стоимости выполнения работ по температурной съемке и определению выбросов токсичных газов с поверхности породных отвалов при использовании действующей и предлагаемой технологии показало, что предлагаемая технология дистанционной температурной съемки и определения выбросов токсичных газов с породного отвала позволяет снизить стоимость работ в $C1/C2 = 208000 \text{ руб.} / (41000 \text{ руб.}) = 5$ раз. Предотвращенный экологический ущерб составит от 3,5 млн. рублей/год.

Использование дистанционных способов контроля позволяет проводить около 10 съемок в месяц, что позволит в течение года провести контроль теплового состояния практически всех горящих породных отвалов Республики (140 отвалов).

Материалы диссертационной работы Козыря Д.А. представляют практическую ценность с точки зрения своевременного предотвращения горения очагов самовозгорания, и снижения выбросов в атмосферный воздух.

Председатель



Р.В. Кишкань

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«МАКЕЕВУГОЛЬ»
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ
«ШАХТА ИМЕНИ С.М. КИРОВА»**

ДНР 86193, город Макеевка, Советский район,
пгт. Свердлово, ул. Свободы, 9
Тел. (06232) 3-06-84
Факс: (06232) 3-33-29
E. mail: s_m_kirova@mail.ru

АКТ

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Козыря Дмитрия Александровича на тему: «Совершенствование систем
мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием
дистанционных методов», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 05.23.19 - экологическая
безопасность строительства и городского хозяйства.

ОП «Шахта имени С.М. Кирова» ГП «Макеевуголь» рассмотрены
результаты диссертационных исследований Козыря Дмитрия Александровича
на тему «Совершенствование систем мониторинга экологической безопасности
породных отвалов с использованием дистанционных методов».

Учитывая, сложившиеся особенности расположения породных отвалов
предприятия и их негативное воздействие на атмосферный воздух,
проведенные исследования по совершенствованию систем мониторинга
позволят обеспечить выполнение требований экологической безопасности и
улучшить состояние атмосферного воздуха в регионе.

Результаты диссертационных исследований на тему «Совершенствование
систем мониторинга экологической безопасности породных отвалов с
использованием дистанционных методов» включены в Программу по
экологической безопасности на территории Донецкой Народной Республики.

В материалах диссертационного исследования обоснована
целесообразность использования беспилотных летательных аппаратов с целью
выявления очагов самовозгорания на ранней стадии горения породных отвалов.
Использование беспилотных летательных аппаратов позволит снизить затраты
и повысить безопасность измерений.

Обоснованная экономически, и с учетом времени достижения углем
температуры самовозгорания, периодичность мониторинга теплового
состояния породных отвалов имеет важное практическое значение.
Своевременный мониторинг теплового состояния породных отвалов с
рекомендуемой периодичностью 1 раз в месяц, позволит выполнять
мероприятия по предотвращению самовозгорания очагов на породном отвале и
снизит выбросы в атмосферный воздух, что улучшит экологическую
обстановку в городе и Донецкой Народной Республике в целом. С развитием

пожара расход средств на его тушение значительно увеличивается, важным является своевременно выявить, локализовать и ликвидировать пожар.

Проведенные лабораторные и натурные исследования, а также разработанное критериальное уравнение, которое учитывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах, позволят локализовать очаги самовозгорания на ранней стадии горения с использованием дистанционных методов.

Приведенное в работе исследование эмиссий токсичных компонентов в местах низкотемпературного окисления поверхности породных отвалов (составляют до 70% выбросов горящего отвала в атмосферный воздух), позволило установить приоритетность мероприятий по предотвращению самовозгорания породных отвалов.

Сопоставление стоимости выполнения работ по температурной съемке и определению выбросов токсичных газов с поверхности породных отвалов при использовании действующей и предлагаемой технологии показало, что предлагаемая технология дистанционной температурной съемки и определения выбросов токсичных газов с породного отвала позволяет снизить стоимость работ в $C1/C2 = 208000 \text{ руб.} / (41000 \text{ руб.}) = 5$ раз.

Результаты диссертационных исследований на тему «Совершенствование систем мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием дистанционных методов» представляют практическую ценность с точки зрения своевременного предотвращения горения очагов самовозгорания, и снижения выбросов в атмосферный воздух включены в Программу развития предприятия.

Директор шахты



А.В. Лер



МЧС ДНР

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОГО ДЕЛА, ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
И ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ «РЕСПИРАТОР»
МИНИСТЕРСТВА ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ
СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
(НИИГД «РЕСПИРАТОР»)**

ул. Артема, 157, г. Донецк, 283048, тел. (062) 332-78-01, факс 332-78-78

Web: www.dnmchs.ru

Идентификационный код 51001452

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

13 ИЮН 2018

№ 10/562

На № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Козыря Дмитрия Александровича на тему: «Совершенствование систем
мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием
дистанционных методов», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 05.23.19 – «Экологическая
безопасность строительства и городского хозяйства».

НИИГД «Респиратор» рассмотрены результаты диссертационных исследований Козыря Дмитрия Александровича на тему «Совершенствование систем мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием дистанционных методов».

Учитывая, сложившиеся особенности расположения породных отвалов, в том числе и горящих, в черте горнопромышленных агломераций и их негативное воздействие на окружающую среду, проведенные исследования по совершенствованию систем мониторинга позволят обеспечить выполнение требований экологической безопасности и улучшить состояние окружающей среды.

Своевременный мониторинг позволит выполнять мероприятия по предотвращению самовозгорания очагов на породном отвале и снизит выбросы в атмосферный воздух, что улучшит экологическую обстановку в горнопромышленных агломерациях. С развитием пожара расход средств на его тушение значительно увеличивается, важным является своевременно выявить, локализовать и ликвидировать пожар.

В диссертационных исследованиях экспериментально установлено, что увеличение расстояния тепловизионной съемки породных отвалов приводит к уменьшению фиксируемой дистанционными методами температуры. Лабораторными и натурными исследованиями определено влияние ракурса температурной съемки на фиксируемую температуру.

Экспериментальные исследования выбросов в атмосферу на поверхности горящего породного отвала установили приоритетность источников эмиссии токсичных компонентов при выполнении мероприятий по тушению и предотвращению самовозгорания породных отвалов. Установлено, что первоначальные мероприятия необходимо выполнять на низкотемпературных зонах эрозии и на выявленных очагах самовозгорания на поверхности породных отвалов с помощью известкового раствора, который предотвращает образование токсичного газа - сероводорода.

В исследовании обоснованы предельные расстояния контроля теплового состояния породных отвалов для углей разной степени метаморфизма с использованием дистанционных методов. Предложен метод оценки стадии горения породных отвалов по соотношению концентраций диоксида углерода к оксиду углерода и по степени превращения кислорода.

В диссертационных исследованиях впервые было установлено, что значение критерия Нуссельта атмосферного воздуха, характеризующее отвод тепла излучением, пропорционально квадратному корню из критерия Нуссельта, характеризующего отвод тепла к породе и, соответственно зависит от теплопроводных свойств породы и атмосферы.

В материалах диссертационного исследования обоснована целесообразность использования беспилотных летательных аппаратов для выявления очагов самовозгорания на ранней стадии горения породных отвалов с оптимальной периодичностью (1 раз/месяц), предложен метод тушения очагов самовозгорания на ранней стадии горения с помощью беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа. Использование беспилотных летательных аппаратов позволит снизить затраты и повысить безопасность измерений.

Результаты диссертационных исследований позволили усовершенствовать разработанную НИИГД «Респиратор» методику контроля теплового состояния породных отвалов. Результаты диссертационных исследований на тему «Совершенствование систем мониторинга экологической безопасности породных отвалов с использованием дистанционных методов» внедрены НИИГД «Респиратор» в методику контроля теплового состояния породных отвалов.

Первый Заместитель директора
по научной работе,
д-р техн. наук, проф.



Пашковский П.С..



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

83001, г. Донецк, ул. Артема, 58
тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78, эл. почта: info@dgtu.donetsk.ua

В диссертационный совет
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
старшего преподавателя кафедры «Природоохранная деятельность»
Козыря Дмитрия Александровича на тему «Совершенствование систем мониторинга
экологической безопасности породных отвалов с использованием дистанционных методов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.23.19- «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства» в научно-
исследовательскую работу Донецкого национального
технического университета

Одной из задач обеспечения экологической безопасности горнопромышленных агломераций является совершенствование систем мониторинга теплового состояния породных отвалов с использованием дистанционных методов.

При разработке научно-исследовательской темы «Совершенствование средств контроля температуры при обеспечении экологической безопасности породных отвалов горных предприятий» (№ госрегистрации 0114U000405), были использованы следующие положения диссертационной работы:

1. Влияние расстояния, ракурса дистанционного контроля теплового состояния породных отвалов и формы очагов самовозгорания на величину температурного контраста.
2. Критериальное уравнение, которое описывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах.
3. Влияние степени метаморфизма угля на предельное расстояние дистанционного контроля теплового состояния породных отвалов.
4. Эмиссии токсичных компонентов на относительно больших площадях поверхности породных отвалов (25%) при температуре поверхности превышающей фоновую на 1..6⁰С.

Начальник научно-исследовательской
части, д.т.н., доцент

А. Л. Сотников

Научный руководитель
д.т.н., профессор

С.П. Высоцкий



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

83001, г. Донецк, ул. Артема, 58
тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78, эл. почта: info@dgtu.donetsk.ua

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
старшего преподавателя кафедры «Природоохранная деятельность»

Козыря Дмитрия Александровича на тему «Совершенствование систем мониторинга
экологической безопасности породных отвалов с использованием дистанционных методов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.23.19-«Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства» в учебный
процесс Донецкого национального технического университета

Результаты диссертационных исследований Козыря Дмитрия Александровича, а именно: критериальное уравнение, которое описывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах и оценка влияния степени метаморфизма угля на предельное расстояние дистанционного контроля теплового состояния породных отвалов, внедрены в учебный процесс в качестве учебного материала в курсах дисциплин «Экологический мониторинг», «Техноэкология», «Оценка антропогенного воздействия на окружающую среду» для студентов направлений 20.03.01 «Техносферная безопасность», 05.03.06 «Экология и природопользование», что отражено в рабочих программах вышеуказанных дисциплин.

Начальник учебного отдела
к.т.н., доцент

Б. В. Гавриленко

Заведующий кафедрой
«Природоохранная деятельность»
к.т.н., профессор

В. Н. Артамонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований при ракурсе 90°

Экран	Расстояние тепловизионной съемки, м								
	27	24	21	18	15	12	9	6	3
	Значения энергетической светимости (R, Дж / (с·м ² ·К ⁴))								
Прямоугольник горизонтальный	723	740	753	765	788	794	795	826	866
Круг	740	744	765	768	771	776	812	839	873
Овал	758	758	730	730	736	794	776	824	857
Прямоугольник вертикальный	774	778	800	804	824	746	866	880	942
Щель горизонтальная	785	812	812	810	824	835	832	851	851
Щель вертикальная	721	726	731	737	767	851	-	816	854
Скорость 0,5 м/с	596	602	614	613	607	622	636	658	690
Скорость 1,4 м/с			474	475	474	476	478	484	495
Скорость 0,4 м/с				465	464	467	467	467	479

Результаты исследований при ракурсе 60°

Экран	Расстояние тепловизионной съемки, м					
	18	15	12	9	6	3
	Значения энергетической светимости (R, Дж / (с·м ² ·К ⁴))					
Прямоугольник горизонтальный	776	785	796	796	826	880
Круг		785	815	813	841	844
Овал			779	795	800	805
Прямоугольник вертикальный	819	832	855	844	881	920
Щель горизонтальная	837	851	861	862	891	894
Щель вертикальная	752	754	786	792	790	836

Результаты исследований при ракурсе 45°

Экран	Расстояние тепловизионной съемки, м				
	15	12	9	6	3
	Значения энергетической светимости (R, Дж / (с•м ² •К ⁴))				
Прямоугольник горизонтальный	788	800	813	828	869
Круг		821	830	844	875
Овал		759	788	817	813
Прямоугольник вертикальный	822	832	861	880	921
Щель горизонтальная	841	861	876	890	911
Щель вертикальная	749	751	792	803	841

Результаты исследований при ракурсе 30°

Экран	Расстояние тепловизионной съемки, м			
	12	9	6	3
	Значения энергетической светимости (R, Дж / (с•м ² •К ⁴))			
Прямоугольник горизонтальный	791	778	824	823
Круг	807	808	804	893
Овал	768	768	773	832
Прямоугольник вертикальный	834	844	880	906
Щель горизонтальная	861	861	874	921
Щель вертикальная	751	771	803	833

ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ПО шахты «Октябрьский рудник»

Очаг самонагрева	Расстояние съемки, м	Энергетическая светимость, R, Дж / (с·м ² · К ⁴)	Температура при контактных измерениях °С	Ракурс
А1	5	403	32	90
	10	393		
	15	389		
	19	386		
А1	5	406		45
	10	395		
	15	391		
	20	388		
	24	387		
	26	385		
А2	10	4467	380	90
	20	3927		
	30	2767		
А3	20	4733	390	90
	25	4048		
	30	3942		
	35	2375		
	40	2204		
А4	4	396	17	90
	5	389		
	6	376		
	7	368		
	8	367		
	9	356		
	10	351		
А5	2	604	53	90
	5	595		
	7	528		
	9	506		
	11	485		
	13	481		
	15	439		
А5	3	537	53	60
	5	517		
	7	453		
	9	429		
	11	412		
	13	401		
	15	396		

ПО шахты им. М.И. Калинина

Очаг тепловыделения	Расстояние съемки, м	Энергетическая светимость, R, Дж / (с·м ² · К ⁴)	Температура, полученная контактным способом °С	Ракурс
Б1	5	625	70	90
	7	608		
	10	586		
	15	575		
	20	568		
Б2	4	450	40	90
	5	438		
	10	413		
	15	385		
	20	382		
	25	375		
	30	369		
	35	357		
Б3	3	696	70	90
	6	674		
	9	670		
	12	640		
	15	633		
	18	619		
	3	645	70	45
	6	604		
	9	599		
	12	601		
	15	556		
	18	533		

ПО шахт им. В. И. Ленина, С.М. Кирова и 13-я бис

Очаг тепловыделения	Расстояние съемки, м	Энергетическая светимость, R, Дж / (с·м ² · К ⁴)	Температура, полученная контактным способом °С	Ракурс
В1	3	393	30	90
	5	384		
	10	378		
	15	367		
	20	366		
	25	358		
Г1	3	751	105	90
	5	696		
	10	617		
	15	613		
	20	594		
	25	557		
Д1	5	438	48	90
	10	430		
	15	424		
	20	420		
	25	414		
	30	407		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫБРОСОВ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОДНОГО ОТВАЛА Ш. ИМ. М.И. КАЛИНИНА

Очаг тепловыделения	Координаты очага		Размеры очага		t, °C	Концентрация загрязняющих веществ, ppm			
	x	y	x	y		CO	SO ₂	NO	H ₂ S
1	42	110	10	5	36,0	3,12	8,56	2,15	-
2	26	142	15	8	28,0	3,08	4,98	2,16	0,910
3	15	119	27	3	36,0	3,21	2,36	1,98	1,00
4	5	174	10	5	36,0	3,06	18,4	1,015	-
5	-20	142	27	6	36,0	3,52	2,45	1,110	-
6	53	86	12	2	36,0	3,41	3,54	1,059	1,00
7	-61	109	5	2	36,0	260	25,1	1,125	0,950
8	-112	167	60	3	24,0	2,11	10,8	1,26	-
9	-112	224	60	3	36,0	2,68	2,32	2,16	-
10	-14	219	3	1	28,0	2,36	4,81	2,38	-
11	11	282	2	2	54,2	5,41	8,95	2,65	0,960
12	-69	330	60	3	38,2	3,26	2,78	1,098	1,00
13	58	351	2	2	75,6	260	13,5	2,16	0,880
14	103	336	2	2	43,0	129	7,52	2,88	0,650
15	117	246	2	2	43,6	120	15,6	2,59	1,00
16	103	261	2	2	55,6	390	23,8	2,48	0,531
17	143	205	3	2	24,0	700	4,98	2,36	-
18	133	174	2	1,5	30,0	120	15,7	2,71	-
19	231	351	60	3	36,0	3,26	6,89	1,058	-
20	259	307	60	3	36,0	2,56	5,46	1,096	-
21	279	266	40	3	36,0	2,78	7,88	1,111	0,751
22	194	130	5	5	54,3	125	12,6	2,78	1,00
23	247	174	2	2	54,2	130	16,7	2,61	0,850
24	245	146	60	3	36,8	2,15	8,88	1,785	0,550
25	248	221	15	3	36,0	2,36	7,46	1,555	-
26	320	205	60	3	36,0	2,45	3,14	1,496	-

Результаты измерений влияния относительной влажности воздуха на концентрацию сероводорода в выбросах с поверхности горящего породного отвала

h, %	33,0	35,1	36,0	35,0	35,0	45,1	45,0	44,1	43,0	45,0	58,1	57,0	59,1	56,0	57,0	67,0	68,0	69,0	68,0	67,0
C(H ₂ S), ppm	6,0	5,0	7,0	6,0	6,0	9,0	10,0	10,0	8,1	10,0	11,0	11,0	10,0	11,0	10,0	22,0	21,0	21,0	20,0	21,0

Результаты измерений на очаге самовозгорания

t _{атм.} , °C	t _{газа} , °C	C(SO ₂), ppm	C(H ₂ S), ppm	h, %
17	66	15,0	6,0	33,0
17	70	14,2	5,0	35,0
17	75	13,1	7,1	36,0
17	70	14,2	6,0	35,0
17	74	15,3	6,0	35,1

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ АТТЕСТАЦИИ ЛАБОРАТОРИИ



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ДОНЕЦКИЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ»
(ГП «ДОНЕЦКСТАНДАРТМЕТРОЛОГИЯ»)

СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ АТТЕСТАЦИИ

№ ИЛ-098/2017

Выдано 23.11.2017
Действует до 23.11.2020

Данное свидетельство подтверждает, что аналитический отдел (расположенный по адресу: ДНР 83017, г. Донецк, бул. Шевченко, д. 25) ОБЩЕСТВА С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ДОНЕЦК-ЭКОЛОГИЯ», ДНР 83114, г. Донецк, Киевский район, ул. Университетская, д. 78, комната 1, соответствует критериям аттестации и аттестован на проведение измерений в сфере распространения государственного метрологического надзора.

Область аттестации приведена в приложении к этому свидетельству и является его неотъемлемой частью.

Генеральный директор
ГП «Донецкстандартметрология»



подпись

Р.М. Кривич

Константин Березин
директор «ДОНЕЦК-ЭКОЛОГИЯ»

Лист 1 листов 1
приложение к свидетельству об аттестации
от 23.11.2017 № ИЛ-098/2017

ОБЛАСТЬ АТТЕСТАЦИИ

аналитического отдела
ОБЩЕСТВА С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ДОНЕЦК-ЭКОЛОГИЯ»
на проведение измерений в сфере распространения
государственного метрологического надзора

Наименование изме- ряемого показателя	Наименование объекта измерений	Диапазон измерения	Погрешность измере- ния
1	2	3	4
03 Измерения параметров потока, расхода, уровня и объёма веществ			
Скорость потока и объемный расход, м/с	Выбросы организованных стационарных источников загрязняющих веществ в атмосферный воздух	2,0 – 20,0 м/с	$\Delta = \pm (0,25 + 0,03V)$ м/с
		от 4 м/с	$\sigma = \leq 2$ м/с
04 Измерения давления, вакуумные измерения			
Давление и разрежение, кПа	Выбросы организованных стационарных источников загрязняющих веществ в атмосферный воздух	минус 1 – 7 кПа	$\delta = \pm 0,5 \%$
		До 2 кПа	$\delta = \pm 1 \%$
05 Измерения физико-химического состава и свойств веществ			
Объемная доля кислорода, %	Выбросы организованных стационарных источников загрязняющих веществ в атмосферный воздух	0 - 21 %	$\Delta = \pm 0,2 \%$
Массовая концентрация оксида азота, млн ⁻¹		0 - 200 млн ⁻¹ 200 - 2000 млн ⁻¹	$\Delta = \pm 20$ млн ⁻¹ $\delta = \pm 10 \%$
Массовая концентрация диоксида азота, млн ⁻¹		0 - 300 млн ⁻¹	$\Delta = \pm 10$ млн ⁻¹
Массовая концентрация оксида углерода, млн ⁻¹		0 - 200 млн ⁻¹ 200 - 5000 млн ⁻¹	$\Delta = \pm 10$ млн ⁻¹ $\delta = \pm 5 \%$
Массовая концентрация диоксида серы, млн ⁻¹		0 - 200 млн ⁻¹ 200 - 5000 млн ⁻¹	$\Delta = \pm 10$ млн ⁻¹ $\delta = \pm 5 \%$
Массовая концентрация взвешенных твердых веществ (пыли), мг/м ³		1 - 10000 мг/м ³	$\delta = \pm 25 \%$
06 Температурные и теплофизические измерения			
Температура, °С	Выбросы организованных стационарных источников загрязняющих веществ в атмосферный воздух	0 – 100 °С	$\Delta = \pm 1$ °С
		100 – 1000 °С	$\Delta = \pm 0,5$ °С
		0 – 100 °С	$\Delta = \pm 1$ °С
		101 – 200 °С 201 – 250 °С	$\Delta = \pm 2$ °С $\Delta = \pm 3$ °С

где V – измеряемая средняя скорость потока

Генеральный директор
ГП «Донецкстандартметрология»



Р.М. Кравчик

**График поверки приборов аналитического отдела
ООО «Донецк-Экология»**

№ п/п	Наименование приборов	Заводской номер	№ св - ва	Дата действия поверки
1.	Барометр-анероид БАММ-1	7631	ДН/ПЮ/СП-037273-ААА	31.10.2018
2.	Весы лабораторные Mettler H 14	382971	ДН/ПЮ/СП-032767-ААА	12.10.2018
3.	Измеритель скорости газовых потоков ИС - 1	577	ДН/ПЮ/СП-033023-ААА	06.11.2018
4.	Измеритель дифференциального давления ОКСИ-1Д	151305	ДН/ПЮ/СП-038436-ААА	06.11.2018
5.	Газоанализатор ОКСИ 5М-5Н	151354	84090/39	21.05.2019
6.	Электроаспиратор М - 822	139	ДН/ПЮ/СП-037317-ААА	31.10.2018
7.	Электроаспиратор М - 822	852967	ДН/ПЮ/СП-037316-ААА	31.10.2018
8.	Гиря 200г F1	92	ДН/ПЮ/СП-032949-ААА	21.11.2018
9.	Пневмометрическая трубка НИИОГАЗ	1330	ДН/ПЮ/СП-032754-ААА	23.10.2018
10.	Пневмометрическая трубка ТН- 1,5	201	ДН/ПЮ/СП-032755-ААА	23.10.2018
11.	Рулетка измерительная РЗУЗД	1	ДН/ПЮ/СП-032647-ААА	25.10.2018
12.	Секундомер СОС пр.-26 -2-000	6777	ДН/ПЮ/СП-035947-ААА	16.10.2018
13.	Гигрометр психрометрический ВИТ-2	А 646	КЛЕЙМО	4кв.2019г.
14.	Термометр ртутный ТЛ-2	171	КЛЕЙМО	4кв.2020г.
15.	Термометр ртутный TGL	б/н1	ДН/ПЮ/СП-037240-ААА	24.10.2020
16.	Мановакуумметр цифровой ММЦ-200	61	ДН/ПЮ/СП-037224-ААА	23.10.2018
17.	Штангенциркуль ШЦ – I-125-0,1	У 07872	ДН/ПЮ/СП-032638-ААА	25.10.2018

Директор ООО «Донецк-Экология»



Н.Ю. Занько