

На правах рукописи

Суков Ярослав Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ
ТОРФА С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
по физико-математическим наукам

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в МИНОБРНАУКИ РОССИИ Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет» (ТГУ) на кафедре физической и вычислительной механики и в Учреждении Российской академии наук «Институт Мониторинга Климатических и Экологических систем» Сибирского Отделения РАН, г. Томск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Голованов Александр Николаевич

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Якимов Анатолий Степанович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Буркина Роза Семеновна

доктор физико-математических наук, профессор
Троицкий Олег Юрьевич

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский
политехнический университет

Защита состоится 12 ноября 2010 г. в 10.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при МИНОБРНАУКИ РОССИИ Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет» (ТГУ) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МИНОБРНАУКИ РОССИИ Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет» (ТГУ) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 12 октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Лесные и торфяные пожары принципиально отличаются от бытовых и производственных количеством горючего материала и площадями горения, протяженностью и скоростью перемещения фронта огня. Специальные подразделения МЧС требуют больших затрат и являются малоэффективными. Экстремальные ситуации могут охватывать большую часть Средней и Западной Сибири. Лесные и торфяные пожары могут возникать на одной и той же территории несколько лет подряд и оказывать глобальное влияние на окружающую среду. Следовательно, актуальность решаемой задачи в данной работе определяется исследованием параметров зажигания и горения торфа с помощью физического и математического моделирования. Результаты такого рода в дальнейшем позволят прогнозировать условия возникновения и распространения фронта торфяных пожаров.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования диссертационной работы являются теплофизические, термокинетические и термодинамические свойства различных видов торфа. Предмет исследования – анализ механизмов зажигания и горения торфа, выяснение предельных условий воспламенения в торфяных залежах.

Цель и задачи исследования

Цели исследований, результаты которых излагаются в данной работе, состоят в следующем:

1. Проведение комплексного экспериментального исследования процессов горения торфа.
2. Определение теплофизических, термокинетических и термодинамических характеристик торфа, его скорости горения с учетом влагосодержания, зольности, пористости, плотности, степени разложения и ботанического состава.
3. Исследование предельных условий зажигания торфа.
4. Анализ и сравнение полученных результатов с натурными явлениями.

Для достижения поставленной цели в работе были определены следующие **задачи**:

1. Обзор публикаций по данной тематике, разработка стендов и создание экспериментальных установок для моделирования процессов зажигания и горения различных видов торфа в лабораторных условиях.
2. Проведение экспериментальных исследований по определению теплофизических, термокинетических и термодинамических характеристик торфа.
3. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа в зависимости от его влагосодержания, зольности, плотности, пористости и степени разложения.
4. Использование полученных выше указанных характеристик в качестве базы данных для математической модели по исследованию процессов зажигания и горения торфа.

Научная новизна данной работы заключается в ниже следующем:

1. Экспериментально найдены теплофизические, термокинетические и термодинамические характеристики торфа различными независимыми способами.
2. Определены критические условия зажигания и режимы горения торфа в лабораторных условиях.
3. Исследован механизм процесса формирования торфяного пожара в зависимости от начальных условий.
4. Впервые обнаружен режим пламенного горения торфа в узком диапазоне скоростей в потоке воздуха.

На защиту выносятся следующее:

1. Результаты экспериментальных исследований теплофизических, термокинетических и термодинамических характеристик, а также процессов сушки, пиролиза, зажигания и горения различных видов торфа.
2. Механизм зажигания и горения торфа.
3. Методики определения минимальной энергии зажигания, скорости горения торфа, коэффициентов удельной теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности, а также коэффициента фильтрации.

Достоверность результатов в работе

Достоверность полученных экспериментальных результатов в данной работе обеспечена использованием различных независимых методик определения теплофизических параметров торфа, статистической обработкой результатов измерений и их сравнением с экспериментальными данными других авторов, опубликованными в научной литературе.

Практическая значимость полученных результатов

1. Полученные в работе результаты вошли в базу данных для математических моделей процессов тепломассообмена, зажигания и горения торфа, которые в дальнейшем будут использоваться для разработки новых способов и устройств пожаротушения.
2. Получен патент №76808 «Устройство для определения пожароопасности хвойного лесного массива».

Апробация работы

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, апробировались на 12 международных и региональных конференциях:

1. 5 Международная конференция «Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия» (г. Красноярск, 2003 г.);
2. Международная конференция «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (г. Горно-Алтайск, 2004 г.);
3. XIII Симпозиум по горению и взрыву (г.Черноголовка, 2005 г.);
4. XXVIII Сибирский теплофизический семинар (г. Новосибирск, 2005г.);
5. Международный научно-технический семинар «Образование через науку» (Калуга, 2005 г.);
6. IX Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование» (г. Томск, 2005 г.);

7. Международная конференция «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия» (Иркутск, 2005 г.);
8. Международная конференция «Пятое Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2006 г.);
9. Международная конференция «Сопряженные задачи механики реагирующих сред» (г. Томск, 2007 г.);
10. 7-я Международная конференция «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф» (г. Томск, 2008 г.);
11. Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды (г. Томск, 2008 г.);
12. 8-я Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (г. Томск 2009 г.).

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 2 статьи в центральной печати в журналах, рекомендованных ВАК.

Автор являлся исполнителем НИР: 2003 г. – базовое финансирование № 1.5.03 «Математическое и физическое моделирование природных (лесных, степных и торфяных) пожаров, оценка вероятности их возникновения и разработка методов прогнозирования их экологических последствий», 2004 г. – базовое финансирование № 1.5.03 «Математическое и физическое моделирование природных (лесных, степных и торфяных) пожаров, оценка вероятности их возникновения и разработка методов прогнозирования их экологических последствий». Стал победителем Всероссийского конкурса на лучшие научно-технические инновационные работы по естественным наукам, г. Саратов, 2004 г. Награжден Дипломом авторского коллектива за победу в 1 туре Всероссийского конкурса инновационных проектов по приоритетному направлению «Рациональное природопользование» 2005 г., Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 140 страниц текста, 24 рисунка и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность работы, цель и задачи исследования, а также краткое содержание работы. Отражена научная новизна работы и практическая значимость результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан краткий литературный обзор и постановка задачи. Обобщена проблема исследований торфяных пожаров. Проведено сравнение математической модели и экспериментальных данных с результатами работ других авторов. Приведена классификация торфяных грунтов, описаны физико-механические и физико-химические свойства торфа, а также его ботанический состав и степень разложения. Проведена оценка влажности и потенциала влаги в торфе в зависимости от плотности и зольности.

Исследовано влияние процесса разложения торфов на выбор методик лабораторных исследований их деформационных и фильтрационных свойств.

Во второй главе описаны экспериментальные установки и методы исследования различных характеристик торфа: коэффициенты удельной теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности, фильтрации, а также характеристики зажигания и горения, степень разложения и ботанический состав различных видов торфа с учетом влагосодержания, плотности, пористости и зольности.

Метод стационарного калориметра по определению коэффициента удельной теплоемкости торфа

Удельную теплоемкость C_p образцов торфа определяли из условия теплового баланса:

$$C = \frac{(M_{ж} + E)(T_p - T_0)C_{ж}}{M_0(T_b - T_p)}, \quad E = \frac{M_3 C_3 (T_b - T_p)}{C_{ж}(T_p - T_0)} - M_{ж}, \quad \text{где } M_3 - \text{масса эталона,}$$

C_3 – удельная теплоемкость материала эталона, T_p – равновесная температура калориметра, E – значение водяного эквивалента калориметра, T_0 – температура калориметра в момент погружения эталона, $M_{ж}$ – масса дистиллированной воды, M_0 – масса образца, T_b – температура образца. Удельную теплоемкость образца материала вычисляли в интервале температур ($T_b - T_p$) как среднее арифметическое результатов трех определений, произведенных на данном образце.

Стационарный метод определения коэффициента теплопроводности торфа

При исследовании коэффициентов теплопроводности в стационарном режиме нагрева тел использовался закон Фурье:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (1)$$

Существенным условием правильности определения λ являлось отсутствие воздушных зазоров между поверхностями исследуемых образцов и плоскими поверхностями нагревателя. Суммарное количество теплоты, выделяемое электрическим нагревателем определялось из закона Джоуля-Ленца:

$$Q = J\Delta U t, \quad (2)$$

Уравнение теплового баланса представлено в виде:

$$Q = 2Q_0 + Q_{\Pi}, \quad (3)$$

где Q_0 – количество тепла, поступающего через площадь основания нагревателя S к исследуемому образцу, Q_{Π} – теплотери через боковую поверхность нагревателя. Тогда искомый коэффициент теплопроводности с учетом формул (1-3) определялся как

$$\lambda = \frac{(Q - Q_{\Pi})\delta}{2\Delta TS} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{2\left(J\Delta U - S_{\delta}\lambda_u \frac{\Delta T_{\Pi}}{\Delta x}\right)\delta}{\pi\Delta TD^2}, \quad (4)$$

Метод динамического калориметра по определению коэффициентов удельной теплоемкости и теплопроводности торфа

В качестве исследуемых образцов брался торф различного типа: 1 - сосново-пушицевый тип торфа, $W = 5.5\%$, зольность $Z = 19\%$, степень разложения $R = 20\%$, 2 - сосново-пушицевый верховой тип торфа, $W = 6.3\%$, зольность $Z = 18\%$, степень разложения $R = 25\%$; 3 - травяно-сфагновый переходный тип торфа, $W = 7.7\%$, зольность $Z = 22\%$, степень разложения $R = 25\%$; 4 - шейхцеригово-сфагновый переходный тип торфа, $W = 15.6\%$, зольность $Z = 24\%$, степень разложения $R = 5\%$.

Продолжительность измерений в температурном диапазоне до 400 К достигала $\sim 2,5$ ч. Ввиду наличия микропор на поверхности материала для обеспечения контакта применялась алюминиевая пудра ГОСТ 5494-71. Систематическая ошибка измерений, обусловленная различной толщиной смазки, переводилась в разряд случайной.

Коэффициент температуропроводности торфа

Экспериментальная установка:

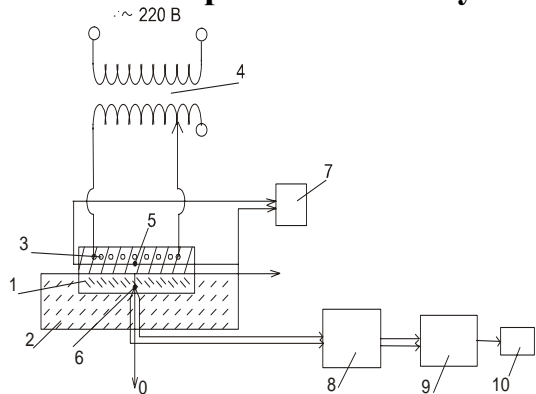


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для определения коэффициента температуропроводности: 1 – исследуемый образец торфа, помещался в теплоизоляционную оболочку – 2; 3 – электрический нагреватель; 4 – автоматический регулятор ЛАТР; 5 – термопара, установленная на поверхности образца; 6 – термопара, заделанная в исследуемый образец на известную глубину – y ; 7 – мультиметр LINI-T; 8 - цифровой запоминающий осциллограф TDS 1000 Tektronix; 9 – расширительный модуль TDS 200; 10 – персональный компьютер.

Определение коэффициента температуропроводности торфа методом неограниченного плоского слоя с граничными условиями первого рода

Метод неограниченного плоского слоя основан на температурном перепаде по толщине образцов торфа. В этом случае нестационарное одномерное уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, t > 0, 0 < y < \infty \quad (5)$$

$$\text{с начальными и граничными условиями } T_{t=0} = T_0, T_{y=0} = T_c, \frac{\partial T}{\partial t}_{b=0} = 0 \quad (6),$$

где $T_c = \text{const}$ – температура на верхней границе исследуемого образца, T_0 – начальная температура образца, a – коэффициент температуропроводности.

Решение краевой задачи (5- 6) имеет вид:

$$Q = \frac{T_c - T}{T_c - T_0} = \text{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) = \text{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{F_{0y}}}\right), \quad (7)$$

где $F_{0y} = \frac{at}{y^2}$ - число Фурье, $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ - функция ошибок или интеграл вероятностей.

Метод определения коэффициента температуропроводности торфа при изменении температуры поверхности образца по линейному закону

Метод неограниченного плоского слоя в математической теории теплопроводности позволяет определять коэффициент температуропроводности материала на верхней границе исследуемого образца $T_y = T_c$, когда ее значение изменялось по линейному закону $T_c = T_0 + bt$, где $b = \frac{dT_s}{dt}$ - скорость нагрева поверхности исследуемого образца, T_0 - начальная температура, равная температуре окружающего воздуха. В этом случае нестационарное одномерное уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < y < \infty, \quad T_{t=0} = T_0, \quad T_{y=0} = T_0 + bt, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{b=0} = 0 \quad (8)$$

Решение краевой задачи (8) находилось при помощи операционного метода Лапласа.

Для удобства расчетов при определении коэффициента температуропроводности, полученное решение записывается как:

$$Q = \frac{T - T_0}{4bt} = i^2 \text{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{F_{0y}}} \right) = i^2 \text{erfc}(z) \quad (9),$$

где специальная функция erfc определялась как $\text{erfc}(z) = 1 - \text{erf}(z)$, искомый коэффициент температуропроводности рассчитывался по формуле $a = \frac{y^2}{4tz}$.

Коэффициент фильтрации Экспериментальная установка

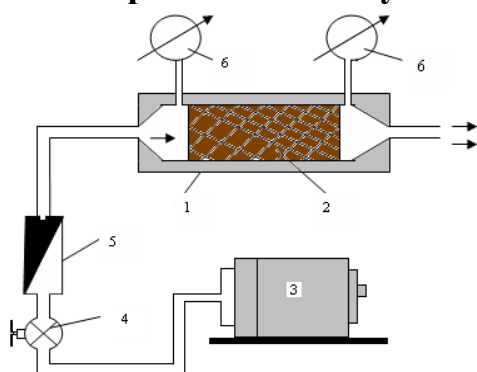


Рисунок 2 – Экспериментальная установка для определения коэффициентов фильтрации воздуха в торфе: 1 – стеклянная цилиндрическая трубка, 2 – исследуемый образец торфа, 3 – компрессор для подачи, 4 – вентилем для регулировки подачи воздуха, 5 – ротаметр типа РС-3 для контроля величины расхода газа, 6 – микроманометры.

Методика определения фильтрационных характеристик торфа

Методика по определению фильтрационных характеристик различных видов торфа заключалась в следующем: в стеклянную цилиндрическую трубку помещали исследуемый образец торфа. Компрессором подавали воздух во внутренний объем трубы, величина расхода газа G регулировалась вентилем,

скорость фильтрации u контролировалась ротаметром типа РС–3. В процессе проведения экспериментов измерялся перепад давления газа ΔP с помощью микроманометра 6 типа ММН–240.

Коэффициент фильтрации K рассчитывался из закона фильтрации Дарси по формуле:

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (10),$$

здесь P - давление, μ - коэффициент динамической вязкости, K - коэффициент проницаемости, u - скорость фильтрации, R_g - газовая постоянная, T - температура.

Формула, для определения параметра проницаемости $\left(\frac{K}{\mu}\right)$ выражается через массовый расход G газа и перепад давления:

$$\frac{K}{\mu} = \frac{2R_g T G h}{(P_1^2 - P_2^2)}, \quad (11)$$

Во время проведения экспериментов по определению коэффициента фильтрации суммарные погрешности не превышали $\delta G \leq 5/2\%$, $\delta P \leq 3.8\%$.

Минимальная энергия зажигания и скорость горения торфа Экспериментальная установка

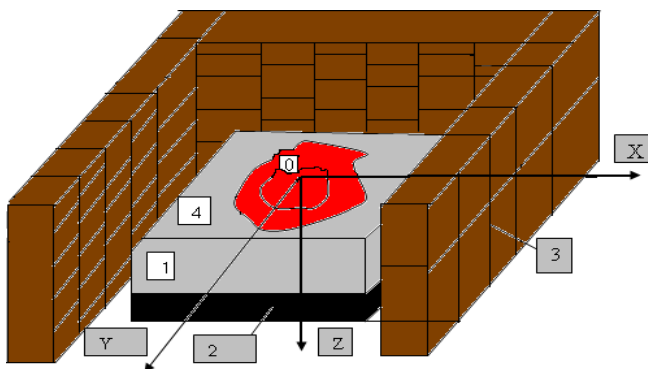


Рисунок 3 – Экспериментальная установка для исследования процессов зажигания и горения торфа: 0 – источник зажигания, 1 – образцы торфа кубической формы, 2 – бетонное основание, 3 – кирпичная кладка, 4 – открытая верхняя поверхность образца торфа.

Методика определения минимальной энергии зажигания и скорости горения торфа в неподвижной атмосфере, а также в потоке воздуха

Эталонным источником зажигания, моделирующим реальные источники зажигания торфа, являлась спираль тонкой намотки из нихромовой проволоки диаметром $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, электрическое сопротивление 23 Ом. Под минимальной энергией зажигания Q понималось значение тепловой энергии, выделяющейся с поверхности эталонного источника зажигания от момента его контакта с поверхностью торфа до момента начала горения образца t_r .

Образцы торфа кубической формы 1 укладывались на бетонное основание 2, при этом боковые поверхности образцов были окружены кирпичной кладкой 3, верхняя поверхность 4 оставалась открытой. Зажигание образцов торфа осуществлялось в центре открытой поверхности образцов в точке 0 с помощью эталонного источника. Геометрические размеры образцов 1 выбирались из условия малости стока тепла через боковые поверхности

образцов: $a/l \ll v$, где a – коэффициент температуропроводности торфа, v – скорость распространения фронта торфяного пожара. В эксперименте задавалась сила тока J и падение напряжения на спирали ΔU , контролировалось ее сопротивление при рабочей температуре. Время зажигания образцов торфа определялось с помощью электронного секундомера типа СЭЦ. Регистрировалась зольность, $Z = m_z/m$, и влагосодержание образцов W , $W = (m - m_k)/m_k$, а также их плотность ρ .

Для моделирования действия ветра образцы горящего торфа обдувались однородным потоком воздуха (использовалась дозвуковая аэродинамическая труба МТ-324), невозмущенная скорость которого v_e была параллельна открытой поверхности образца торфа. Скорость горения, положения фронта пожара и температура торфа определялись с помощью хромель-алюмелевых термопар с диаметром спая $2 \cdot 10^{-4}$ м., расположенных по трем взаимно-перпендикулярным направлениям x , y , z , а положение фронта пожара, тип режима горения фиксировались на фотокамеру. Плотность теплового потока q измерялась экспоненциальным методом с помощью датчика теплового потока, скорость распространения фронта пожара v как отношение пути, пройденным фронтом пожара в единицу времени t .

Результаты экспериментальных данных, полученные методом стационарного калориметра

№ п/п	W, %	M, кг	T _b , °K	C _p , Дж/кг·K	λ, Вт/м·K
□	5.5	0,03	353	1175,31	5.073
2	6.3			1720,51	5.11
3	7.7			1450,6	5.091
4	15.6			1624,37	5.018

Таблица 1 – Экспериментальные данные зависимости коэффициентов удельной теплоемкости C_p и теплопроводности λ образцов торфа от влагосодержания

Экспериментальные данные, полученные методом динамического калориметра

Полученные зависимости C_p и λ_{ef} от температуры при различном влагосодержании торфа $W = (m_0 - m_k)/m_k$, где m_k – конечная масса образцов, высушенных при температуре 373 K, показаны на рисунке 4. При этом плотности образцов составляли $\rho = (351-453)$ кг/м³.

Обращает на себя внимание факт немонотонной зависимости c_p и λ_{ef} от температуры. Следует отметить, что при температурах $T \geq 473K$ процесс практически завершился, оставался коксовый остаток в виде серого порошка. Немонотонность зависимостей c_p и λ_{ef} от температуры можно объяснить многокомпонентностью состава торфа (разными скоростями нагрева его составных компонентов).

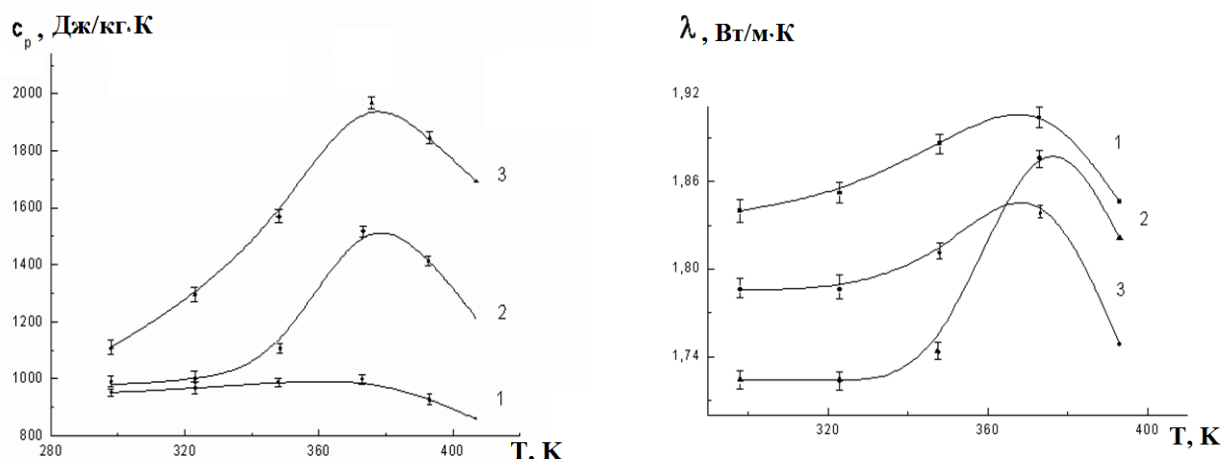


Рисунок 4 – Зависимости удельной теплоемкости и теплопроводности образцов торфа от температуры. Кривая 1 – сосново–пушицевый тип торфа, $W = 6.3\%$, $Z = 18\%$, $R = 25\%$; кривая 2 - травяно-сфагновый переходный тип торфа, $W = 7.7\%$, $Z = 22\%$, $R = 25\%$; кривая 3 - шейхцериево-сфагновый переходный тип торфа, $W = 15.6\%$, $Z = 24\%$, $R = 5\%$.

Суммарные коэффициенты теплоемкости и теплопроводности торфа можно представить через объемные доли φ_i : $C_p = \sum_{i=1}^3 c_{pi} \varphi_i$, $\lambda_{ef} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \varphi_i$, (12),

где $i=1$ для сухого торфа, $i=2$ для свободной влаги, $i=3$ для газовой фазы (для начальных условий – воздух). При нагревании торфа вследствие пиролиза

состав газовой фазы менялся: $C_{p3} = \sum_{\alpha=1}^4 c_{p\alpha} c_{\alpha}$, $\lambda_3 = \sum_{\alpha=1}^4 \lambda_{\alpha} c_{\alpha}$, (13),

где c_{α} – массовые доли газовой фазы ($\alpha = 1$ для O_2 , $\alpha = 2$ для N_2 , $\alpha = 3$ для паров NO_2 , $\alpha = 4$ для CO_2). При полном двухфакторном эксперименте варьировались влагосодержание и температура, а величины C_p и λ_{ef} были аппроксимированы следующими ниже формулами:

$$C_p = (765.0 - 1577.8W)\exp[(0.64 \cdot 10^{-3} + 0.0175W)T],$$

$$\lambda = (0.585 - 0.495W + 0.987W^2) \cdot T^{0,2} \quad (14), \text{ при } 298 \text{ K} \leq T \leq 373 \text{ K}, 0 \leq W \leq 0.2,$$

с погрешностью аппроксимации $\delta C_p \leq 9.7\%$, $\delta \lambda \leq 0.6\%$. Полученные экспериментальные данные по коэффициенту температуропроводности торфа приведены в таблице 2.

№ п/п	T_c , К	$T_{\text{торф}}$, К	T_0 , К	Q	Z, %	$a, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
1	325,2	279,67	296	0.459	19	0.0741
2	292,32	279,67		0.654	18	0.0630
3	319,59	286,33		0.654	22	0.0473
4	317,32	279,67		0.243	24	0.0413

Таблица 2 – Экспериментальные данные по определению коэффициента температуропроводности торфа

Сравнение методик по определению коэффициентов удельной теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности торфа дает

удовлетворительное согласование между собой, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Экспериментальные данные для коэффициента фильтрации

№ п/п	W	$\rho_T, \frac{кг}{м^3}$	$K, с$
1	5.5	419.7	3.787
2	6.3	453.2	4.734
3	7.7	351.9	1.339
4	15.6	410.6	2.159

Таблица 3 – Фильтрационные константы для различных образцов торфа с учетом плотности ρ и влагосодержания W торфа

Из таблицы видно, что для сухого торфа увеличение плотности образцов приводит к увеличению коэффициента фильтрации K , причем эта зависимость близка к линейной. Торф большей плотности имеет меньшие диаметры пор, с чем и связано ухудшение фильтрации воздуха через поры торфа. Для образцов торфа примерно одинаковой плотности $\rho = (350 - 450) \frac{кг}{м^3}$ увеличение влагосодержания W ухудшает фильтрационные процессы, коэффициент фильтрации воздуха возрастает в несколько раз. Анализ влажных и сухих образцов торфа показал, что влага закупоривала мелкие поры, препятствуя прохождению через них воздуха.

В третьей главе проводилось экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа, определялись минимальная энергия зажигания и предельные условия потухания торфа. Рассматривалось горение торфа в потоке воздуха и в неподвижной атмосфере. Исследовались процессы сушки и пиролиза различных видов торфа.

Экспериментальное исследование процессов сушки и пиролиза торфа, определение термокинетических констант

Экспериментальные исследования процессов сушки и пиролиза торфа проводились в изотермических условиях при температурах 337, 363, 403 К. Изотермические условия создавались в сушильном шкафу. После установления заданной температуры образцы торфа помещались в сушильный шкаф и через определенные промежутки времени взвешивались на аналитических весах АДВ-200М. Контролировались: относительная влажность ϕ в объеме сушильного шкафа с помощью влагомера ВКФ-43 и психрометра аспирационного М-34, атмосферное давление P с помощью барометра-анероида БАММ-1, температура T окружающего воздуха в сушильном шкафу - ртутным лабораторным термометром. По результатам взвешивания были найдены влагосодержание W и плотность образцов торфа ρ . Кроме того, контролировалась зольность, $Z = m_z/m$, где m_z – масса сгоревшего остатка образца торфа. Суммарные погрешности определения параметров не превышали $\delta m < 2.1\%$, $\delta T < 4\%$, $\delta p < 3.7\%$, $\delta Z < 5.2\%$. Каждый опыт повторялся по 3–5 раз, после чего рассчитывались их среднеарифметические значения и доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0.95. Для устранения систематической погрешности, связанной с нарушением процесса термостатирования образцов торфа при их выемке из сушильного шкафа и

взвешивании на весах, сушке подвергались одновременно три образца, два из которых взвешивались в различные моменты времени через 5, 10, 20 мин. и т. д., а третий - в начале и в конце сушки. Систематическая погрешность при этом не превышала 4.3%. Зависимость убыли массы образцов торфа от времени для процессов сушки и пиролиза при различных плотностях ρ , влагосодержании W и зольности Z торфа показаны на рисунке 5.

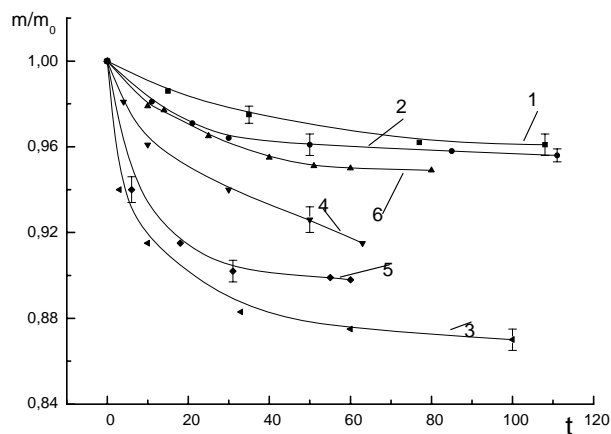


Рисунок 5 – Зависимость убыли массы образцов торфа от времени. m/m_0 – масса сухого образца к массе влажного торфа, t – время сушки образцов, мин. Кривые 1, 2 – травяно-сфагновый переходный тип торфа; кривая 3 – сосново-пушицевый верховой тип торфа; кривые 4, 6 – шейхцериево-сфагновый переходный тип торфа.

Анализ полученных результатов

Полученные результаты свидетельствуют о сильной зависимости убыли массы образцов торфа от начального влагосодержания W и плотности ρ для процесса пиролиза (кривая 3), при $T = 403 \text{ K}$. Так, при одинаковом влагосодержании увеличение плотности торфа в 2 раза приводит к более интенсивному пиролизу (кривые 1, 2), а увеличение влагосодержания в 3 раза - к более интенсивным процессам: сушке и пиролизу (кривые 1, 3). Унос свободной и связанной влаги при сушке происходит быстрее при меньшей плотности торфа (кривые 4, 5). Однако низкая зольность торфа может существенно изменить скорость сушки (кривые 4, 6), что свидетельствует о сложности процессов массообмена в торфе и его зависимости от структуры материала и ботанического состава. С помощью «формально-кинетического подхода», скорость испарения влаги и скорость образования продуктов пиролиза, описывалась уравнениями (15-16). Здесь использовался закон Герца-Кнудсена модифицированный проф. А.М.Гришиным.

$$\frac{dm_1}{dt} = -(m_1 - m_{1K})K_1, \quad K_1 = K_{01} \exp\left(-\frac{L_1}{RT}\right) \quad (15)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = -(m_2 - m_{2K})K_2, \quad K_2 = K_{02} \exp\left(-\frac{L_2}{RT}\right)$$

$$\text{с начальными условиями} \quad m_1(0) = m_{1H} \quad m_2(0) = m_{2H} = m_{1K} \quad (16)$$

Так же необходимо отметить, что при сушке торфа в нормальных условиях, когда его температура значительно ниже температуры горения,

движущей силой процесса является разность между давлением насыщенного пара и парциальным давлением паров воды.

Для изотермического процесса интегрирование уравнений (15-16) дает

$$\begin{aligned} \ln(m_1 - m_{10}) &= \ln(m_{1н} - m_{10}) - K_1(T)t, \\ \ln(m_2 - m_{20}) &= \ln(m_{2н} - m_{20}) - K_2(T)t, \end{aligned} \quad (17)$$

Эффективные константы и теплоты K_{01} , K_{02} , L_1 , L_2 определялись методами спрямления.

№ п/п	Процесс	Z, %	ρ , кг/м ³	W, %	L_1, L_2 , Дж/моль	K_{01}, K_{02} , с ⁻¹
1	Сушка	19	419.7	5.5	47367	$1.425 \cdot 10^7$
2	Сушка	22	453.2	6.3-7.7	8642.4	$2.6 \cdot 10^6$
3	Пиролиз	24	410.6	15.6	6315.6	$1.9 \cdot 10^6$

Таблица 4 – Термокинетические характеристики торфа для процессов сушки и пиролиза

Анализ результатов, представленных в таблице 4, показывает, что на величины L_i и K_{0i} в большей степени оказывала влияние зольность образцов торфа. Также нужно сказать о сильной зависимости макрокинетических параметров торфа от глубины залегания, степени разложения.

Определение минимальной энергии зажигания торфа, анализ полученных экспериментальных данных

Используя описанную выше методику при проведении экспериментов, была определена минимальная энергия зажигания образцов торфа, взятых с глубины $(15-25) \cdot 10^{-2}$ м, результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Зависимость минимальной энергии зажигания образцов торфа от влагосодержания, плотности, пористости и зольности

№ п/п	W, %	ρ , кг/м ³	П	Z, %	R, %	Q, Дж	$\pm \delta Q$, Дж
1	5.5	419.7	0.44	19	20	142.5	41.2
2	6.3	453.2	0.75	18	25	243.8	51.9
3	7.7	351.9	0.57	22	25	181.25	37.3
4	15.6	410.6	0.42	24	5	162.5	41.2

Из таблицы видно, что с возрастанием плотности торфа минимальная энергия зажигания возрастает. Это связано с прогревом большей массы торфа до температуры зажигания. Зольность исследуемых образцов в опытах оставалась приблизительно одинаковой. Уменьшение зольности на 21% приводит к увеличению Q на 13% при одинаковой плотности и пористости торфа, что свидетельствует о влиянии степени разложения образцов на значение минимальной энергии зажигания Q. Увеличение плотности и пористости торфа приводило к возрастанию минимальной энергии зажигания, однако и при низком значении $\rho = 0.351 \cdot 10^3$ кг/м³ величина Q возрастала до 181.25 Дж. Наличие в порах воздуха снижало эффективный коэффициент теплопроводности и увеличивало время прогрева образцов торфа, поэтому их зажигание наступало позже.

Наличие влаги в торфе приводит к увеличению минимальной энергии зажигания Q в связи с появлением дополнительных затрат энергии на испарение влаги. Обращает на себя внимание факт уменьшения минимальной энергии зажигания Q при наличии небольшого количества влаги, что обеспечивает более благоприятные условия для прогрева образцов торфа за счет кондукции, передачи тепла вглубь образца.

Горение торфа в неподвижной атмосфере, определение предельных условий потухания

Из экспериментов видно, что в условиях естественной конвекции торф горит в беспламенном режиме, или режиме тления. После зажигания торфа фронт пожара самозаглублялся в нижние слои, что связано с различием плотности и условий фильтрации, соотношением между горючим и окислителем. Фронт горения неоднороден, цвет продуктов сгорания торфа серо-белый, сам процесс сопровождался дымообразованием. Серия экспериментов проводилась на установке 3. Полученные результаты по определению скорости горения торфа в зависимости от его плотности и влагосодержания в условиях естественной конвекции приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Зависимости скорости горения торфа от влагосодержания, зольности и плотности

№ п/п	W , %	Z , %	ρ , кг/м ³	z , 10 ⁻² м	v , мм/мин	$\pm\delta v$
1	5.5	19	419.7	0	0.6	0.12
2	6.3	18	453.2	0	0.1	0.10
3	7.7	22	351.9	2	0.8	0.15
4	15.6	24	410.6	8	0.7	0.21

Из таблицы видно, что влияние этих показателей на скорость горения значительное. Зависимость скорости горения торфа от плотности немонотонно. Существует оптимальное значение $\rho_*=0.352 \cdot 10^3$ кг/м³, при котором скорость горения максимальна. При низкой плотности скорость горения мала из-за недостатка горючего материала и низкого коэффициента теплопроводности торфа. Высокие значения плотности ρ препятствуют фильтрационным процессам в порах торфа, связанным с притоком окислителя и уносом продуктов сгорания. Присутствие влаги увеличивает скорость горения на 30%, что можно объяснить возрастанием эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$, аналогично влиянию малых значений влагосодержания на минимальную энергию зажигания. Однако дальнейшее увеличение W приводит к резкому снижению скорости горения, связанному с затратами тепла на испарение влаги. Скорость горения торфа на глубине $z = 2 \cdot 10^{-2}$ м такая же, как на поверхности, а при $z = 8 \cdot 10^{-2}$ м скорость на 20% ниже, чем на поверхности, что объясняется увеличением ρ и затруднением поступления окислителя к горючему материалу через поры образцов торфа. Полученные данные удовлетворительно согласуются с результатами Ан.А. Борисова и Ал.А. Борисова, Горелика Р.С. (Экспериментальное исследование и математическое моделирование торфяных пожаров// Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984 г., С. 5-22).

Механизм горения торфа можно определить как беспламенный диффузионный, при котором скорость горения будет определяться фильтрационно–диффузионными процессами подвода окислителя (воздуха) через пористую структуру торфа к сухому горючему. В пользу предложенного механизма свидетельствует немонотонная зависимость скорости горения торфа от его плотности, а также специальные эксперименты по зажиганию торфа в инертной среде. Образцы торфа помещались в сосуд, заполненный инертным газом – аргоном. На поверхность образца устанавливался эталонный источник зажигания, при этом процесс зажигания торфа не происходил.

При анализе полученных результатов было выявлено, что существуют критические значения плотности $\rho_* = 0.352 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и влагосодержания $W_* = 7.7\%$, при которых минимальная энергия зажигания резко возрастает. Такое явление можно объяснить условиями переноса тепла вглубь образцов торфа и значением эффективного коэффициента теплопроводности.

Горение образцов торфа в потоке воздуха

Исследования горения торфа проводились на экспериментальной установке, схема которой показана на рисунке 3. Для моделирования действия ветра образцы горящего торфа обдувались однородным потоком воздуха, невозмущенная скорость которого v_e была параллельна открытой поверхности образца торфа. Скорость горения, положения фронта пожара и температура торфа определялись с помощью хромель-алюмелевых термопар, расположенных по трем взаимно-перпендикулярным направлениям. Положение фронта пожара и тип режима горения фиксировались на фотокамеру, снимки приведены на рисунке 6.



образец №1



образец №2

Рисунок 6. №1 - травяно-сфагновый переходный тип торфа,
№2 - сосново–пушицевый верховой тип торфа.

Скорость пламенного горения на поверхности образцов торфа возрастала, а в глубине замедлялась, это связано с притоком окислителя при действии ветра и сменой кинетики процесса горения. Скорость горения на поверхности торфа была выше для пламенного режима горения в потоке воздуха, чем при беспламенном режиме из-за интенсификации диффузионных потоков окислителя вглубь образцов.

По мере приближения фронта пожара температура торфа повышалась и в зоне горения достигала максимальных значений $T_{max} = (683 - 873) \text{ К}$. Полученные значения скоростей горения торфа на поверхности образцов v_1

вдоль координаты OX и в глубине вдоль координаты OZ приводятся в таблице 7. В зависимости от скорости ламинарного потока воздуха v_e , был обнаружен пламенный режим горения торфа, который наблюдался в узком диапазоне скоростей $2.5 \frac{M}{c} \leq v_e < 3.0 \frac{M}{c}$.

Таблица 7 – Скорость горения торфа на поверхности и в глубине образцов в ламинарном потоке воздуха

№ п/п	v_e , м/с	v_1 , м/с	v_2 , м/с	Примечания
1	0	$9.69 \cdot 10^{-6}$	$9.41 \cdot 10^{-6}$	Беспламенное горение (режим тления)
2	2.5	$5.38 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	Пламенное горение
3	3.0	$4.77 \cdot 10^{-5}$	$4.88 \cdot 10^{-5}$	Беспламенное горение в потоке газа (режим тления)

В четвертой главе исследовались процессы зажигания и горения торфа. Описывалась постановка задачи математического моделирования процессов зажигания торфа, а так же методика расчетов. В математической модели, разработанной проф. А.М. Гришиным, рассматривалась однотемпературная, одномерная, нестационарная задача. Считалось, что в самом слое торфа имело место испарение свободной влаги, экзотермическая реакция горения коксика, а также гомогенные реакции пиролиза торфа и горение оксида углерода. Следовательно, в процессе зажигания торф считался многофазной средой, состоящей из сухого органического вещества, гигроскопической воды, прочно связанной с этим органическим веществом, продукта пиролиза органического вещества – коксика, а также конденсированного и газообразного продуктов горения.

Газовая фаза в слое торфа состоит из шести компонентов: CO, H₂O, O₂, CO₂, CH₄ и N₂. Влияние тепловыделения от горения компонента H₂ невелико в силу незначительной начальной концентрации его и низких температур, которые имели место в процессе тления проницаемого слоя торфа. Рассматривался слой торфа, у которого начальная объемная доля газовой фазы φ_{5H} ($0.1 < \varphi_{5H} < 0.2$) невелика по сравнению с объемными долями конденсированной фазы. Процессы зажигания и тления торфа для простоты анализа считались одномерными. При горении слоя торфа в результате процесса пиролиза образовывался кокс, который затем тлел в ходе экзотермической реакции. Математически сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho_s \varphi_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s \varphi_s v}{\partial z} = Q, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = - \frac{\mu}{\xi} v,$$

$$\sum_{i,s} c_{i,s} \rho_{i,s} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_s \varphi_s c_{ps} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_1 r_1 + q_{1,s} R_{1,s} - q_{2,s} R_{2,s} + q_{3,s} R_{3,s} + q_{4,s} R_{4,s} + q_2 r_2,$$

$$\varphi_s \rho_s \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + v \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_s \varphi_s D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) - c_\alpha Q + R_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \quad (18)$$

$$\rho_{1,s} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1,s}, \quad \rho_{2,s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2,s}, \quad \rho_{3,s} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1,s} - R_{3,s} - \alpha_4 R_{3,s}, \quad \rho_{4,s} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3,s} \quad (19)$$

$$\sum_{\alpha=1}^N c_\alpha = 1, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad P = \frac{\rho_5 RT}{M}, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^n \frac{c_\alpha}{M_\alpha}$$

Систему уравнений (18) необходимо решать при использовании следующих начальных и граничных условий:

$$T|_{t=0} = T_H, \quad \rho_5|_{t=0} = \rho_{5H}, \quad c_\alpha|_{t=0} = c_{\alpha H}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \quad \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{iH}, \quad i = 1, \dots, 4,$$

$$\alpha_e (T_e - T) = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad T|_{z \rightarrow \infty} = T_H \quad (20)$$

Используя аналогию процессов тепло- и массообмена ($\beta_e = \alpha_e / c_{p5}$), имеем граничные условия:

$$\beta_e (c_{ae} - c_\alpha|_{z=0}) = \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad P|_{z=0} = P_e,$$

$$c_\alpha|_{z \rightarrow \infty} = c_{\alpha H}, \quad v = 0, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \quad (21).$$

Итоговые гомогенные химические реакции в проницаемом слое торфа имеют вид: $CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$,



а уравнения химической кинетики:

$$\frac{dy_1}{dt} = -k_1 x_1 x_3^{0.25} T^{-3.25} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) = r_1, \quad \frac{dy_2}{dt} = -k_2 x_5^{-0.5} x_3^{1.5} \frac{P}{T} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) = r_2$$

Будем считать, что в результате зажигания торфа образуется фронт горения, который состоит из зон прогрева, сушки и пиролиза торфа, а также зон горения газообразных и конденсированных продуктов пиролиза с последующим образованием слоя пепла.

Для испарения свободной влаги в объеме конденсированной фазы торфа использовался закон Герца-Кнудсена. Для нахождения парциального давления паров воды в слое торфа использовался закон Дальтона. Эффективный коэффициент диффузии брался по формуле Фристрема-Вестенберга.

Источники и стоки из (18), (19) имеют вид: $R_1 = \eta_1 R_{1s} - M_1 r_1$,

$$R_2 = \eta_2 R_{1s} - R_{2s} + 2M_2 r_2, \quad R_3 = -\eta_{3s} - M_3 r_1 / 2 - 2M_3 r_2, \quad R_4 = M_4 (r_1 + r_2),$$

$$R_5 = \eta_4 R_{1s} - M_5 r_2, \quad R_{1s} = k_{1s} \rho_{1s} \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{1s}}{RT}\right), \quad R_{3s} = \frac{M_c}{m_3} s_3 k_{3s} \varphi_5 \rho_5 \varphi_3 c_3 \exp\left(-\frac{E_{3s}}{RT}\right),$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + R_{3s}, \quad \alpha_c = \frac{M_{\infty}}{M_H - M_{\infty}}, \quad \eta_1 = \frac{M_1}{M_H}, \quad \eta_2 = \frac{M_2}{M_H}, \quad \eta_3 = \frac{M_3}{M_c}, \quad \eta_4 = \frac{M_5}{M_H} \quad (23)$$

Точное аналитическое решение задачи о прогреве полубесконечного сплошного инертного тела при граничных условиях третьего рода имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad t > 0, \quad 0 < z < \infty, \quad T_{t=0} = T_H, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + \alpha_e (T_e - T|_{z=0}) = 0, \quad T|_{z \rightarrow \infty} = T_H,$$

$$T = T_e - (T_e - TF) \left[\Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) + \exp(\gamma z + \psi) \Phi^* \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} + \sqrt{\psi} \right) \right]$$

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-y^2) dy, \Phi^*(z) = 1 - \Phi(z), \gamma = \alpha_e / \lambda, \psi = at\gamma^2$$

Оказалось, что для малых моментов времени $t < 1$ мин. точность численного решения не превышала аналитического с погрешностью меньше 1%. Система уравнений (18), (19) с начальными и граничными условиями (20), (21) решалась итерационно-интерполяционным методом. На рисунке 7 зависимость времени зажигания реагента от коэффициента теплообмена представлена для внешнего источника при $\varphi_{1H} = 0.7$, $\varphi_{2H} = 0.2$, $\rho_{1s} = 923 \text{ кг/м}^3$, $c_{3H} = 0.23$. С увеличением интенсивности внешнего воздействия: T_e , α_e время зажигания сокращается. При уменьшении величины коэффициента теплообмена до $\alpha_e \leq 0.5 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ для $800 \text{ К} \leq T_e \leq 900 \text{ К}$ скорость тления не превышает скорости пиролиза торфа и зажигание образца отсутствует. Это связано, как с уменьшением массообмена с внешней средой (недостаточно кислорода в порах реагента), так и с ростом теплоотвода во внешнюю среду, который становится большим и превышает теплоприход от экзотермической реакции окисления кокса.

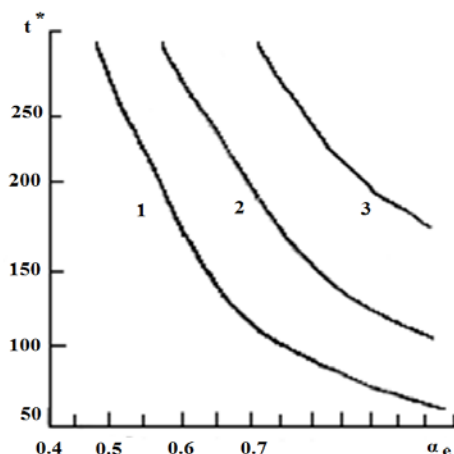


Рисунок 7 – Зависимость времени зажигания торфа от коэффициента теплообмена для внешнего источника с температурой T_e : 1 – 700 К, 2 – 800 К, 3 – 900 К, при $\varphi_{1H} = 0.7$, $\varphi_{2H} = 0.2$, $c_{3H} = 0.23$.

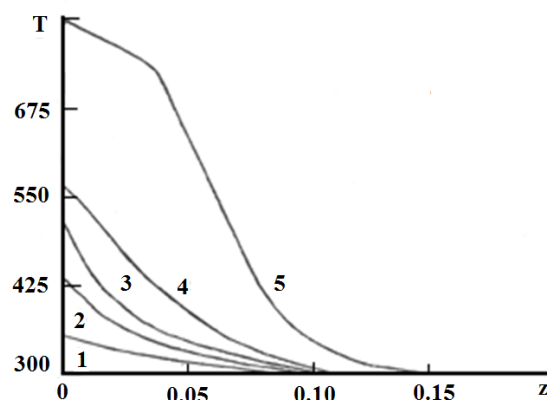


Рисунок 8 – Зависимость температуры от пространственной переменной в различные моменты времени: 1–5; 2– 10; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 22.16 час.; $T_e = 800 \text{ К}$; $\alpha_e = 1.1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $\varphi_{1H} = 0.7$, $\varphi_{2H} = 0.2$, $c_{3H} = 0.23$.

На рисунке 8 изображены поля температур конденсированной фазы, а на рисунке 9 – концентрации компонентов в проницаемой среде (торфе) по пространству для режима тления в различные моменты времени при $\varphi_{1H} = 0.7$, $\varphi_{2H} = 0.2$, $c_{3H} = 0.23$, $T_e = 800 \text{ К}$, $\alpha_e = 1.0 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$.

Объемные доли компонентов пористой среды по пространству приведены на рисунке 10, где сплошные кривые отвечают исходному реагенту

(φ_1), штриховые – связанной влаги (φ_2), штрихпунктирные – коксу (φ_3), штрихпунктирную с двумя точками – золе (φ_4).

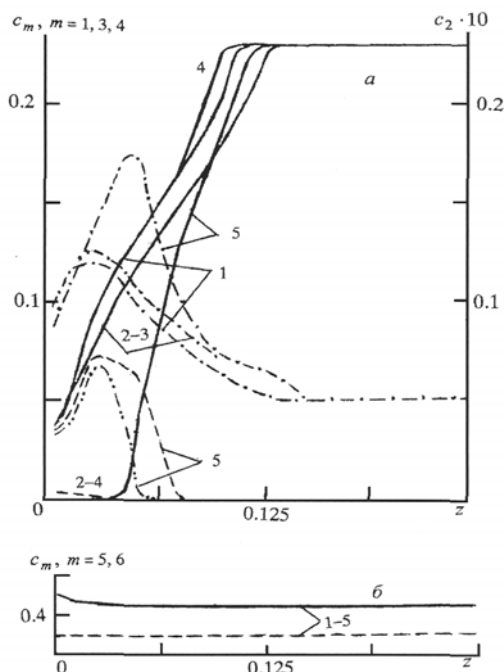


Рисунок 9 – Распределение концентраций компонент по глубине образца для опорных входных данных и в те же самые моменты времени, что и на рисунке 8 – сплошные кривые отвечают O_2 , штриховые – H_2O , штрихпунктирные – CO , штрихпунктирные с двумя точками – CO_2 , б – сплошные линии – N_2 , штриховые – CH_4 .

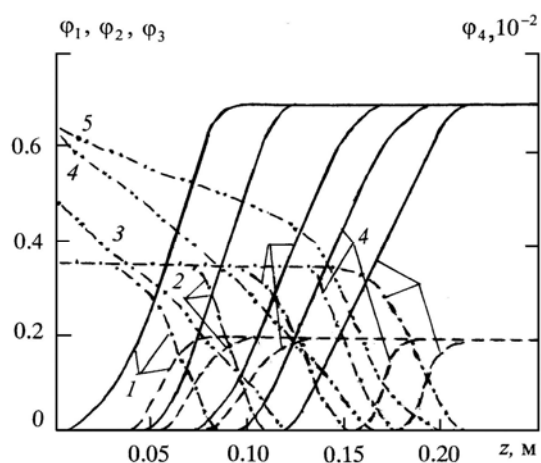
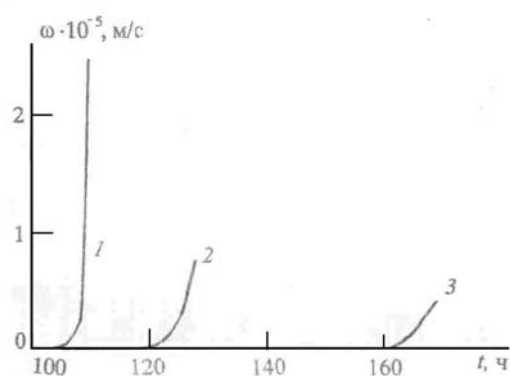


Рисунок 10 – Зависимости объемных долей от пространственной переменной в те же самые моменты времени, что и на рисунке 8. Сплошные кривые соответствуют исходному реагенту (торфу), штриховые – свободной влаги, штрихпунктирные – коксу, штрихпунктирная с двумя точками – золе.



На рисунке 11 представлена величина линейной скорости процесса тления торфа от времени для $\varphi_{1н}=0.7$, $\varphi_{2н}=0.2$, $\rho_{1s}=923$ кг/м³, $T_e=900$ К, $\alpha_e=1$. Кривая 1 отвечает начальной концентрации кислорода $c_{3н}=0.23$, 2 – $c_{3н}=0.05$, 3 – $c_{3н}=0.025$.

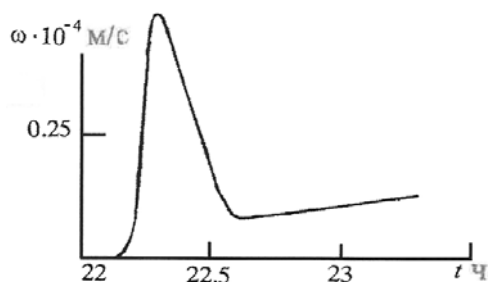


Рисунок 12 – Зависимость линейной скорости тления торфа от времени при входных данных рисунка 8.

Из анализа результатов задачи следует, что с ростом температуры проникаемого фрагмента среды сначала имеет место прогрев и испарение

связанной воды. При этом объемная доля свободной влаги при $t \geq 15$ исчезает, превращаясь в концентрацию паров H_2O . В области высокой температуры $T > 380K$ начинается процесс пиролиза исходного реагента с появлением основной массы паров воды и кокса. Продукт пиролиза – кокс начинает выгорать (тлеть) в результате экзотермической реакции окисления вглубь фрагмента пористой среды с образованием золы. В то же время продукт пиролиза газообразный CO , который появляется при $T \leq 700K$ и метан практически не окисляются в ходе гомогенных реакций с образованием CO_2 и H_2O , т.к. концентрация последних мала или изменяется незначительно в силу низких температур реагирующей среды. Из рисунка 11 видно, что время зажигания реагента увеличивается с уменьшением концентрации кислорода. Этот эффект обусловлен лимитированием процесса тления торфа, содержанием окислителя в порах образца.

Данный результат качественно согласуется с экспериментальными данными работы Гундара С.В. (Определение минимальной концентрации кислорода при беспламенном горении почв // Лесное хозяйство.– 1976.– №5.– С. 53-54), где одним из способов борьбы с торфяными пожарами был предложен метод, основанный на изоляции очагов горения от окружающего воздуха. На рисунке 12 представлена зависимость линейной скорости процесса тления торфа от времени. Зависимость $\omega = \omega(t)$ носит немонотонный характер. Вначале скорость тления возрастает от нуля до некоторого большого значения, что обусловлено воспламенением от внешнего очага горения. Затем скорость тления снижается. Этот эффект обусловлен сгоранием прогретого слоя торфа и формированием зоны нестационарного тления, представляющей собой совокупность области фильтрации, опережающей зону химического превращения.

В выводах сформулированы основные научные результаты, полученные при подготовке и написании настоящей диссертационной работы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Получены теплофизические, термокинетические и термодинамические характеристики различных типов торфа в зависимости от степени разложения, зольности, плотности, влагосодержания с учетом его фильтрационных свойств.

2. С помощью полученной базы данных по теплофизическим свойствам торфа, модифицированной математической модели проф. А.М. Гришина, были рассмотрены процессы тепломассообмена, зажигания и горения в торфе.

3. Экспериментально исследованы режимы (беспламенного горения) тления и пламенного горения торфа в неподвижной атмосфере и в потоке воздуха.

4. Определены критические значения плотности $\rho_* = 0.352 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и влагосодержания $W_* - 7.7\%$, при которых минимальная энергия зажигания торфа резко возрастает.

5. Найдена оптимальная скорость потока воздуха 2.5 м/с при которой наблюдается переход от режима тления к режиму пламенного горения торфа.

6. Выяснены механизмы зажигания и горения торфа.
7. Определена скорость горения торфа при беспламенном и пламенном режимах, как в условиях неподвижной атмосферы, так и в потоке воздуха, моделирующего ветер в природных условиях при торфяных пожарах.
8. Установлено, что с ростом объемной доли влаги при $\varphi_{1н} = 0,6$ и повышением пористости торфа при $\varphi_{2н} = 0,2$ время зажигания реагента увеличивается. При снижении содержания кислорода в воздухе время зажигания торфа возрастает.
9. Проведен анализ влияния влагосодержания, зольности, пористости, плотности торфа на процессы теплообмена в образцах различного типа с учетом его степени разложения.

Список публикаций по теме диссертации

1. Голованов А.Н. О математическом моделировании процессов зажигания и тления торфа / А.Н. Голованов, А.С. Якимов, А.А. Абрамовских, **Я.В. Суков** // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15, № 4. – С. 1-9.
2. Абрамовских А.А. Теплофизические свойства торфа / А.А. Абрамовских, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, Ю.И. Прейс // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 52, № 2/2. – С. 36-42.
3. Гришин А.М. Экспериментальное исследование теплофизических и термокинетических характеристик торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков** // ИФЖ. – 2005. – № 10. – С. 42-48.
4. Гришин А.М. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, Ю.И. Прейс // ИФЖ. – 2005. – № 10. – С. 49-55.
5. Гришин А.М. Экспериментальное определение теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристик торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков** // ИФЖ. – 2006. – Т. 79, № 3. – С. 131-136.
6. Гришин А.М. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, Ю.И. Прейс // ИФЖ. – 2006. – Т. 79, № 3. – С. 137-142.
7. Гришин А.М. Экспериментальное исследование характеристик торфяников и торфяных пожаров / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков** // Мат-лы 5-ой междунар. конф. – Красноярск, 2003. – С. 92.
8. Гришин А.М. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа и его фильтрационных теплофизических и термокинетических характеристик / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, А.А. Абрамовских, **Я.В. Суков** // Мат-лы междунар. конф. – Горно-Алтайск, 2004. – С. 68.
9. Гришин А.М. О механизме зажигания и горения торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, А.А. Абрамовских // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия : мат-лы 6-й междунар. конф. – Иркутск, 2005. – С. 38.

10. Гришин А.М. Зажигание торфа и его некоторые характеристики / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков** // XIII симпозиум по горению и взрыву. – Черногловка, 2005. – С. 77-78.
11. Голованов А.Н. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа / А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, Ю.И. Прейс // Образование через науку : мат-лы междунар. науч.-технич. симпозиума, посвященного 175-летию Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана : в 3 т. – Калуга, 2005. – Т. 1. – С. 319-322.
12. Гришин А.М. Пламенное горение торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, А.А. Абрамовских // Пятые Окуневские чтения : тез. докл. Междунар. конф. – СПб., 2006. – С. 60-62.
13. Абрамовских А.А. Теплофизические свойства торфа различного ботанического состава / А.А. Абрамовских, А.Н. Голованов, П.А. Куприянов, **Я.В. Суков** // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : мат-лы междунар. конф. – Томск, 2007. – С. 7.
14. Абрамовских А.А. Потенциал влагопереноса лесных горючих материалов / А.А. Абрамовских, А.Н. Голованов, **Я.В. Суков** // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : мат-лы междунар. конф. – Томск, 2007. – С. 8.
15. Голованов А.Н. Теплофизические свойства разных видов торфа / А.Н. Голованов, А.А. Абрамовских, **Я.В. Суков**, Ю.И. Прейс // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф : мат-лы 7-й междунар. конф. – Томск, 2008. – С. 32.
16. **Sukov Ya.V.** Thermal and physical properties of the peat with different botanical composition / **Ya.V. Sukov**, Yu.I. Preis, A.N. Golovanov, A.A. Abramovskikh // International conference on environmental observations, modeling and information systems. – Tomsk, 2008. – P. 79.
17. **Sukov Ya.V.** Mathematical modeling of process of ignition of peat / **Ya.V. Sukov**, A.S. Yakimov, A.N. Golovanov // International conference on environmental observations, modeling and information systems. – Tomsk, 2008. – P. 79-80.
18. Голованов А.Н. Теплофизические свойства различных видов торфа / А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, Ю.И. Прейс // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : мат-лы 8-й всерос. конф. с участием зарубежных ученых. – Томск, 2009. – С. 34-35.
19. Голованов А.Н. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфяных залежей / А.Н. Голованов, **Я.В. Суков**, Ю.И. Прейс // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : мат-лы 8-й всерос. конф. с участием зарубежных ученых. – Томск, 2009. – С. 36-37.