

На правах рукописи



Кулеш Роман Николаевич

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ЗАЖИГАНИИ
И ГОРЕНИИ МАССИВА ТОРФА**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Заворин А.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.
Богомолов Александр Романович
доктор технических наук, профессор
Лебедев Виталий Матвеевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита диссертации состоится «21» декабря 2010 года в 14:30 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 в Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2, корпус 10, ауд. №228.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «20» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. ф.-м. н.



Долматов О.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Торф относится к перспективным энергоносителям, значение которых в ближайшие годы будет непрерывно расти в связи с надвигающимся на мировое сообщество дефицитом традиционных энергоресурсов, который обусловлен истощением запасов нефти и газа. Запасы же торфа очень велики, кроме того в приповерхностных слоях земли идут процессы, ведущие к расширению его объемов.

Реальное использование торфа в энергетике и в технологиях переработки сдерживается не только наличием более ценных топлив, но в немалой мере и потому, что торф является пожароопасным веществом, хранение, транспортировка и переработка которого связаны с опасностью его возгорания. В то же время пока не разработано как общей теории зажигания и горения торфа, так и процессов тепломассопереноса, протекающих в торфе при зажигании и горении. Отсутствуют и экспериментальные данные об основных закономерностях этих процессов. Развитие теории сдерживается отсутствием сведений о теплофизических и термохимических характеристиках торфа, а также продукта его пиролиза – кокса и продукта сгорания – золы.

Таким образом, актуальность решаемых в данной работе задач определяется тем, что недостаточность опубликованных экспериментальных данных по процессам тепломассопереноса в слое торфа при его зажигании и горении является одним из существенных факторов, сдерживающих как расширение масштабов использования торфа в качестве энергоносителя, так и значительный прогресс в области разработки и эффективной реализации мер по прогнозированию и предотвращению пожаров в естественных условиях залегания и при хранении торфа. Ежегодно ухудшающуюся обстановку с пожарами (в том числе торфяными) в Российской Федерации и в мире трудно переоценить, в связи с чем исследования в данном направлении являются особенно значимыми.

Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета («Научные основы, моделирование и оптимизация технологий переработки горючих ископаемых»), а также Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» (научно-исследовательские работы по лоту 2010-1.1-229-093 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области производства топлива и энергии из органического сырья») и соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ («Топливо и энергетика», «Экология и рациональное природопользование», «Энергетика и энергосбережение»), а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспектив развития («Системы математического моделирования»).

Целью работы является экспериментальное определение основных закономерностей тепломассопереноса при зажигании и горении торфа, обусловленное тем, что существующие математические модели рассматриваемого явления имеют ряд допущений, применение которых должно подтверждаться экспериментально.

Основные задачи исследования:

- физическое моделирование процесса возгорания и горения торфа, в том числе проведение соответствующих экспериментов в широких пределах изменения определяющих параметров и выделение основных закономерностей процессов тепломассопереноса при зажигании и горении торфа;
- получение новых данных по свойствам торфа и продуктов его термического разложения для использования при реализации имеющейся математической модели;
- проведение численных экспериментов и сравнение их с результатами физического моделирования;
- обоснование рекомендаций по технологии хранения, добычи и переработки торфа с минимизацией связанных с ними возгораний и аварийных ситуаций.

Научная новизна заключается в следующем:

- впервые экспериментально установлены пределы теплофизических условий зажигания торфа и его горения в широком диапазоне изменения влажности и в разных условиях теплообмена источника зажигания с окружающей средой и торфом;
- сформулированы новые положения общей физической модели тепломассопереноса при зажигании и горении торфа;
- впервые определены теплофизические характеристики вещества кокса и зольного остатка торфа (истинные значения);
- на основе новых экспериментальных данных протестирована известная математическая модель и получена удовлетворительная сходимость численных расчетов с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы:

- полученные данные по теплофизическим свойствам промежуточных продуктов горения торфа применимы в математических моделях возгорания и горения торфа, в том числе при оценке и прогнозах пожарной обстановки, что повышает их достоверность;
- на основе экспериментально установленных параметров предельных теплофизических условий зажигания торфа от внешнего теплового источника обоснованы рекомендации по минимизации возгораний торфа при его добыче, хранении и переработке, применимые в различных технологиях;
- отдельные положения работы используются Сибирским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства и торфа СО Россельхозакадемии;

- основные результаты используются в учебном процессе в дисциплинах по специальности 140502 «Котло- и реакторостроение» «Основы физико-химических процессов производства тепловой энергии», «Технология сжигания органических топлив», «Моделирование физических процессов и объектов проектирования», при выполнении выпускных квалификационных работ и в магистерской программе «Технология воды и топлива в энергетике» по направлению 140100 «Теплоэнергетика».

Достоверность полученных результатов исследований обеспечивается применением апробированных методик экспериментальных исследований, проведением поверки установок на эталонных образцах, оценками систематических и случайных ошибок, системой повторяемости опытов при фиксированных значениях основных факторов, а также удовлетворительной сходимостью результатов экспериментов с результатами других авторов.

На защиту выносятся:

- методика экспериментальных и численных исследований температурных полей и процессов теплообмена в системе «нагретый источник – торф»;
- результаты экспериментальных и численных исследований по определению характеристик, состава и теплофизических свойств, параметров тепломассообмена, зажигания и горения торфа;
- физическая модель тепломассообмена при зажигании и горении торфа от внешнего теплового источника.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на международных и региональных конференциях, в том числе на XV Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (2009 г., Томск), VI Всероссийском семинаре вузов по теплофизике и теплоэнергетике (2009 г., Красноярск), Региональной научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (2009 г., Томск), Международной научно-практической конференции «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири» (2009 г., Томск), VII Всероссийской конференции с международным участием: «Горение твердого топлива» (2009 г., Новосибирск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в центральной печати в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 126 наименований, содержит 40 рисунков, 31 таблицу и 134 страницы текста.

Личный вклад автора состоит в разработке и планировании экспериментальных исследований, разработке и изготовлении экспериментальной установки для исследования условий зажигания и распространения очага горения в слое торфа, проведении экспериментов, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов и заключения по диссертации. В научном руководстве работой в части

планирования экспериментальных исследований, методологии математического моделирования процессов возникновения и распространения торфяного пожара принимал участие к. ф.-м. н. А.Н. Субботин.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, показаны ее научное и практическое значение, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткий анализ состояния изучаемой проблемы, включая основные направления применения торфа.

Обзор технологий использования торфа показал, что затруднения при их осуществлении прежде всего связаны с этапами добычи сырья и его подготовки. Эти операции характеризуются повышением опасности возникновения и распространения пожара, т.к. из торфа выводится влага, в некоторых случаях способная сдерживать распространение торфяного пожара.

Приведены сведения об известных условиях возгорания торфа и исследованиях в данной области, развитии физико-математической модели этого явления. Показана эволюция развития работ и представлений об условиях и теории процесса возгорания и горения торфа, значительный вклад в которые внесли своими работами Э.В. Конев, А.А. Борисов, Г.А. Доррер, А.М. Гришин, А.Н. Субботин и др. На основе обобщающего анализа этих публикаций сформулированы задачи исследований, соответствующие поставленной цели работы.

Во второй главе представлены основные методические положения исследований, их назначение, последовательность и схема проведения, в том числе методика подготовки исследуемых образцов торфа, промежуточных и конечных конденсированных продуктов его сгорания (кокса и золы). Особое внимание уделено оснащению и методике экспериментов для определения условий возгорания торфа, а также для определения теплофизических характеристик рассматриваемых веществ.

Определение состава и теплотехнических характеристик торфа и твердых продуктов его горения проведено по стандартным методикам, что потребовало выполнения определенных условий при отборе и подготовке проб анализируемого материала.

Теплофизические характеристики торфа c_p и λ определялись методом динамического калориметра с помощью измерителей теплоемкости ИТ- c_p -400 и теплопроводности ИТ- λ -400. Градуировка приборов проводилась по образцам с известными теплофизическими свойствами из меди и кварцевого стекла. Условия эксплуатации приборов ИТ- c_p -400 и ИТ- λ -400 не позволяют проводить измерения теплофизических свойств образцов при потере массы, поэтому теплоемкость и теплопроводность торфа определены до температуры 398 К, а теплоемкость и теплопроводность кокса – до 498 К. Теплоемкость золы найдена в диапазоне максимально возможной температуры, создаваемой прибором, – 673 К. Суммарные погрешности

определения теплофизических характеристик торфа не превышали $\delta\sigma_p \leq 8,4\%$, $\delta\lambda \leq 7,37\%$.

Для экспериментов по определению времени зажигания торфа потребовалась разработка оригинальной методики и элементов установки.

При проведении экспериментов стальной образец цилиндрической формы размерами $0,05 \times 0,05$ м помещался в печь и нагревался до необходимой по условиям проведения экспериментов температуры. После чего он вынимался из печи и служил источником зажигания. Для этого он помещался в измерительную ячейку (рис. 1) размерами $0,2$ м в диаметре и $0,1$ м высотой с предварительно подготовленным и размещенным в ней слоем торфа.

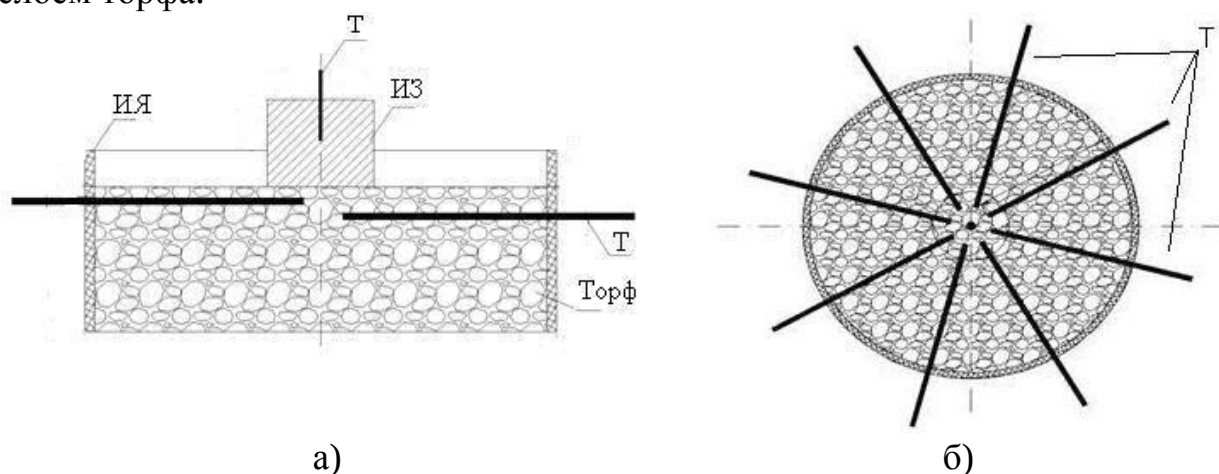


Рис. 1. Схема измерительной ячейки для определения момента зажигания и фиксации температурных полей: а) поперечный разрез; б) горизонтальный разрез по нижней плоскости размещения термопар

В измерительной ячейке в определенной последовательности с известными координатами горячих спаев установлены термопары (Т), фиксирующие температуры в известных точках слоя торфа, отстоящих друг от друга по его высоте и радиусу. В качестве параметров зажигания торфа определены: период зажигания (временной отрезок от момента контакта источника зажигания с массивом торфа до момента фиксации превышения температуры в любой из контролируемых точек над температурой источника), а также минимальная начальная температура источника зажигания, необходимая для инициации очага горения. Варьируемыми факторами при исследованиях являлись влажность торфа (от 10 до 50% на рабочую массу) и режим теплообмена источника зажигания с окружающей средой, который изменялся посредством использования теплоизолирующего покрытия. Все рассмотренные в экспериментах условия имитируют натурные ситуации.

Приведены мероприятия, направленные на обеспечение достоверности полученных результатов, и методика оценки погрешностей экспериментов.

В третьей главе дана характеристика объекта исследования в сравнении с известными данными по торфу.

Охарактеризован объект исследования как типичный торф средней степени разложения, высоковлажный, коричнево-черный по цвету, преимущественно верхового типа, среднекалорийный, высокозольный. Отобранные образцы характеризовались большой неоднородностью внешней составляющей влажности, которая зависела главным образом от высоты местности, на которой производился отбор. В последующем из образцов готовились лабораторные пробы с доведением до воздушно-сухого состояния.

Сравнение полученных данных со справочными позволяет сделать вывод о том, что исследуемый торф обладает типичными составом и свойствами, а, значит, результаты настоящей работы применимы в достаточной мере к большинству российских торфяных месторождений, что дает основания для расширения сферы использования полученных в работе результатов.

На рис. 2 представлены результаты определения теплоемкости и теплопроводности исследуемых образцов.

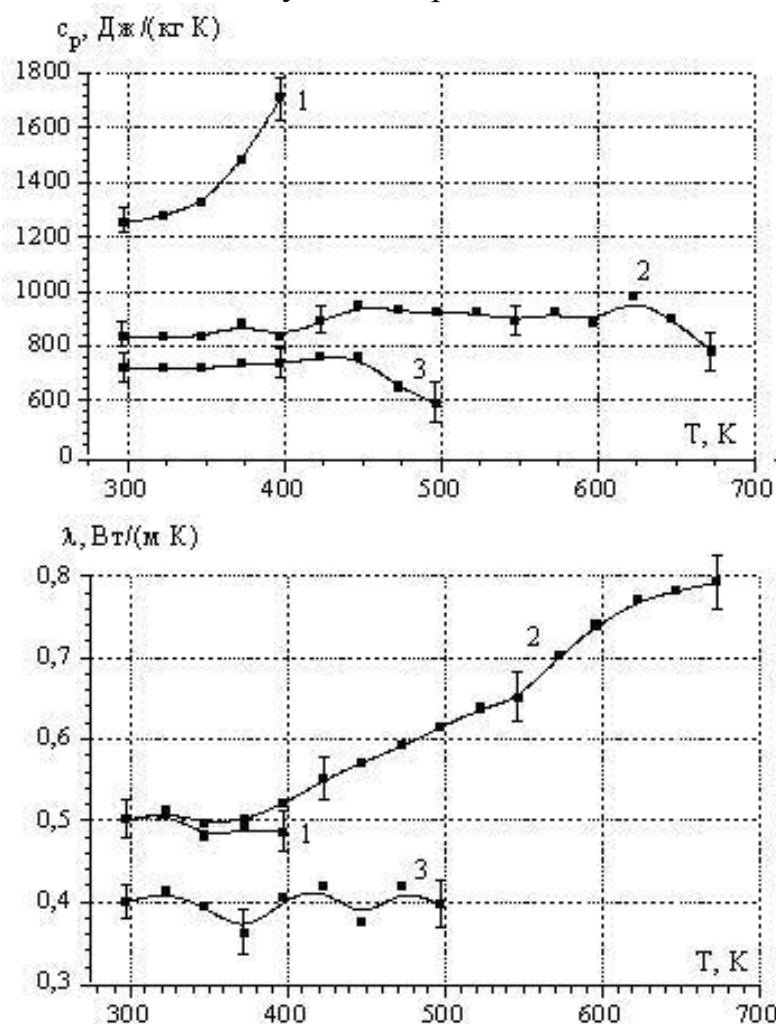


Рис. 2. Зависимость теплоемкости (а) и теплопроводности (б) от температуры: 1–торф, 2–зола, 3–кокс.

Немонотонный характер зависимостей c_p и λ от температуры обусловлен неоднородностью торфа и соответственно разными скоростями нагрева входящих в его состав компонентов. Как следует из анализа

зависимостей $C_p(T)$, истинные теплоемкости золы и кокса в исследуемом диапазоне температур можно считать почти постоянными. Средняя истинная теплоемкость золы равна 884,9 Дж/(кг·К), кокса – 706,7 Дж/(кг·К), а истинные значения теплопроводности торфа и кокса равны соответственно 0,493 Вт/(м·К) и 0,398 Вт/(м·К).

Результаты экспериментов по исследованию параметров зажигания торфа в различающихся условиях теплообмена с окружающей средой позволили получить зависимости периода времени задержки зажигания и минимальной температуры источника зажигания от влажности торфа (рис. 3).

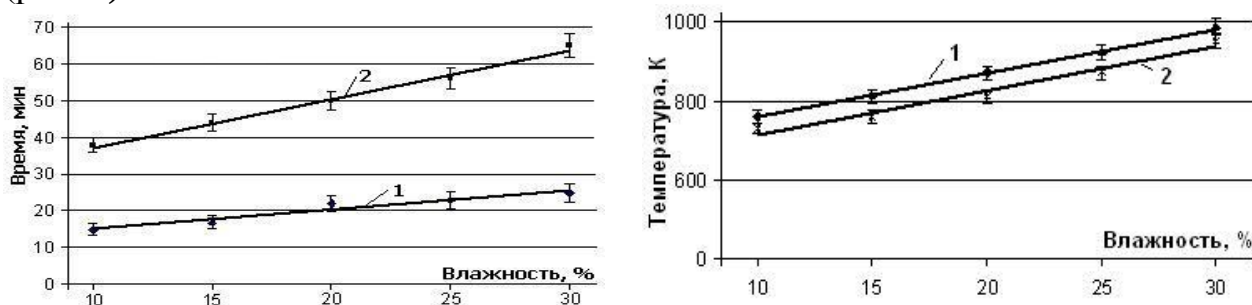


Рис. 3. Зависимость периода задержки зажигания и начальной температуры источника от влажности торфа: 1–естественные условия теплообмена с окружающей средой; 2–источник зажигания в тепловой изоляции.

Увеличение влажности торфа приводит к увеличению периода задержки зажигания, т.к. до начала реакции горения необходимо испарить большее количество влаги. Это влечет также увеличение начальной температуры источника при прочих равных условиях. К увеличению периода задержки зажигания и уменьшению ядра горения приводит и повышение плотности торфа, т.к. при этом затрудняется диффузия кислорода к зоне горения. Экспериментально установленные положения физической картины зажигания подтвердились последующими численными расчетами.

Следует отметить, что некоторая очевидность основных качественных результатов экспериментальных исследований является подтверждением их достоверности и непротиворечивости относительно фундаментальных основ теплофизики. Проведенные эксперименты, моделирующие возникновение и распространение очага горения в массиве торфа, позволили сделать количественные оценки по всем исследованным параметрам, тем самым являясь основой для дальнейшего использования в математической модели и базой для анализа рекомендаций по минимизации возгораний торфа и их локализации.

В четвертой главе приведена физическая и математическая постановка задачи, описана используемая математическая модель возгорания и начального этапа горения торфа. Даны результаты численных расчетов условий возникновения и распространения торфяного пожара в широком диапазоне начальных параметров, а также сопоставление полученных данных с экспериментальными.

На рис. 4 приведена схема рассматриваемой задачи, математическая модель которой содержит ряд допущений: предполагается, что в слое торфа отсутствуют неоднородности, а условия тепло- и массообмена с окружающей средой считаются такими, что задачу можно решать в цилиндрической системе координат. Начало координат располагается на поверхности слоя торфа в центре основания источника тепла, при этом ось $\bar{r}$ направлена вдоль верхней поверхности массива торфа, а ось $\bar{z}$ – от верхней поверхности вглубь слоя.

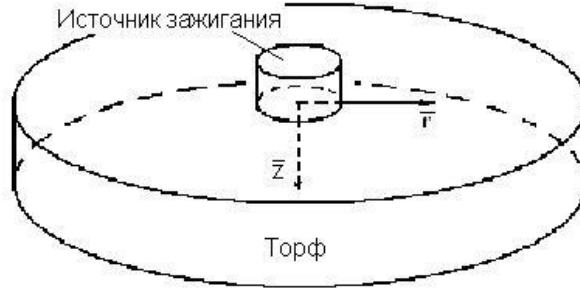


Рис. 4. Схема рассматриваемой задачи

Учитываются испарение влаги, разложение торфа, гетерогенная и гомогенная реакции окисления кокса и оксида углерода. Предположим, что распределением температуры по радиусу и высоте источника зажигания в силу его высокой теплопроводности можно пренебречь. Учитывается изменение энергии источника за счет тепловых потерь в окружающую среду вследствие конвекции и излучения, и передачи в слой торфа. Тогда система уравнений, описывающая рассматриваемый физический процесс, имеет вид:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_p, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{S2}, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \gamma_c R_p - R_{S3}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \gamma_s R_p, \quad \sum_{j=1}^5 \varphi_j = 1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5) + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}}(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 u) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}}(\rho_5 \varphi_5 v) = \gamma_g R_p + R_{S2} + R_{S3}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}}(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 u c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}}(\rho_5 \varphi_5 v c_\alpha) = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}} \right) + R_{5\alpha} + R_{S5\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, 3, \quad \sum_{\alpha=1}^4 c_\alpha = 1, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^5 \rho_j \varphi_j c_{pj} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left(u \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} + v \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} \right) = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} \right) + q_{CO} R_{CO} + q_{S3} R_{S3} - q_{S2} R_{S2}, \quad (4)$$

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \bar{r}}, \quad v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{z}} - \rho_5 g \right), \quad p = \frac{\rho_5 R T}{M}, \quad M = 1 / \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_{5\alpha}}. \quad (5)$$

Система уравнений (1)–(5) решалась при следующих краевых условиях:

$$t = 0: \quad \varphi_j = \varphi_{jH}, \quad j = \overline{1,4}, \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1,3}, \quad \rho_5 = \rho_{5H}, \\ T|_{\bar{r} \leq r_0, \bar{z}=0} = T_0, \quad T|_{\bar{r} > r_0, \bar{z}=0} = T_H, \quad T|_{\bar{z} \neq 0} = T_H; \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\bar{r} = 0: \quad & \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{r}} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \bar{r}} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} = 0; \\
\bar{r} = L: \quad & c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad T = T_H, \quad p = p_H; \\
\bar{z} = 0: \quad & p|_{\bar{r} > r_0} = p_e, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{r} \leq r_0} = 0, \quad V_0 c_0 \rho_0 \frac{dT}{dt} = S_0 \lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{r} \leq r_0} - S_e q_e, \\
& \lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{r} > r_0} = \bar{\alpha}_1 (T - T_e), \quad \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{r} > r_0} = \beta_1 (c_\alpha - c_{ae}), \quad \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{r} \leq r_0} = 0; \\
\bar{z} = h: \quad & \frac{\partial p}{\partial \bar{z}} = -\rho_5 g, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}} = 0, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} = \alpha_2 (T - T_s).
\end{aligned} \tag{7}$$

Здесь уравнения (1) – законы сохранения массы исходного конденсированного вещества (торфа), влаги, кокса и золы соответственно; (2) – уравнение сохранения массы газовой фазы; (3) – уравнения сохранения массы отдельных компонентов ($\alpha = 1$ – кислорода, $\alpha = 2$ – оксида углерода, $\alpha = 3$ – водяного пара) и алгебраическое соотношение, необходимое для замыкания системы уравнений (3); (4) – уравнение сохранения энергии; (5) – уравнение движения в форме Дарси в проекциях на оси координат $\bar{r}$ и $\bar{z}$ и уравнение состояния; (6) – начальные условия; (7), (8) граничные условия по r и z соответственно; t – время, с; $\bar{r}$, $\bar{z}$ – цилиндрические координаты, м; ρ_j, φ_j ($j=1, \dots, 5$) – истинные плотности и объемные доли торфа, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно, кг/м³, м³/м³; R_p, R_{S2}, R_{S3} – массовые скорости разложения торфа, испарения влаги и окисления кокса, кг/(м³·с), кг/(м²·с), кг/(м²·с); $R_p = k_p \rho_1 \varphi_1 \exp(-E_p/RT)$, $R_{S2} = \rho_2 \varphi_2 (k_{S2}/\sqrt{T}) \exp(-E_{S2}/RT)$, $R_{S3} = (M_3/M_{51}) s \rho_5 \varphi_5 c_1 k_{S3} \varphi_3 \exp(-E_{S3}/RT)$; $E_p, E_{S2}, E_{S3}, k_p, k_{S2}, k_{S3}$ – энергия активации и предэкспоненциальный множитель гомогенной реакций разложения торфа, гетерогенных реакций испарения влаги и окисления кокса, Дж/моль, Дж/моль, Дж/моль, 1/с, м/с, м/с; s – удельная поверхность пор, 1/м; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К); c_1 – массовая концентрация кислорода; T – температура среды, К; $\gamma_c = \nu'_3 M_3 / \nu_1 M_1$, $\gamma_s = \nu'_4 M_4 / \nu_1 M_1$, $\gamma_g = \sum_{\alpha=2}^4 \nu'_{5\alpha} M_{5\alpha} / \nu_1 M_1$ – массовые доли кокса, золы и газовой фазы, образующиеся при пиролизе торфа; $M_3, M_{51}, M_{52}, M_{53}, M_{54}$ – атомарная масса углерода и молекулярные массы кислорода, оксида углерода, паров воды и азота, кг/моль; $\nu_1, \nu'_3, \nu'_4, \nu'_{5\alpha}$ – стехиометрические коэффициенты; u, v – компоненты скорости фильтрации газообразных продуктов в направлении цилиндрических осей координат $\bar{r}$ и $\bar{z}$, м/с; c_2, c_3 – массовые концентрации оксида углерода и паров воды; D_α – эффективный коэффициент диффузии α -компоненты, м²/с; $R_{51} = -(M_{51}/2M_{52})R_{CO}$ – массовая скорость потребления кислорода за счет реакции окисления оксида углерода, кг/(м³·с); $R_{CO} = T^{-2.25} k_{CO} (c_1 M / M_{51})^{0.25} (c_2 M / M_{52}) \exp(-E_{CO}/RT)$ – массовая скорость окисления оксида углерода, кг/(м³·с); E_{CO}, k_{CO} – энергия активации и предэкспоненциальный множитель реакции окисления оксида углерода,

Дж/моль, 1/с; $R_{S51} = -(M_{51}/M_3)R_{S3}$ – массовая скорость потребления кислорода за счет реакции окисления кокса, кг/(м²с); $R_{52} = \gamma_{CO}R_P - R_{CO}$ – скорость изменения массы оксида углерода, кг/(м³с); $R_{S52} = 0$, $R_{S53} = R_{S2}$, $R_{53} = \gamma_{H_2O}R_P$ – массовая скорость образования паров воды при пиролизе торфа, кг/(м²с); $\gamma_{CO} = \nu'_{52}M_{52}/\nu_1M_1$, $\gamma_{H_2O} = \nu'_{53}M_{53}/\nu_1M_1$ – массовые доли оксида углерода и водяного пара, образующиеся при пиролизе торфа; c_{pj} (j=1,...,5) – удельные теплоемкости торфа, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно, Дж/(кг·К); $\lambda = \lambda_s + \lambda_R$ – эффективная теплопроводность торфа, Вт/(м·К); $\lambda_R = 16\sigma T^3/s$ – лучистая составляющая теплопередачи, $\lambda_s = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \varphi_j$ – теплопроводность многофазной среды, Вт/(м·К); $c_{p5} = \sum_{\alpha=1}^4 c_{p5\alpha} c_\alpha$, $\lambda_5 = \sum_{\alpha=1}^4 \lambda_{5\alpha} c_\alpha$ – удельная теплоемкость и теплопроводность газовой фазы в порах, Дж/(кг·К), Вт/(м·К); q_{S2} , q_{S3} , q_{CO} – тепловые эффекты реакций испарения влаги, окисления кокса и оксида углерода, Дж/кг; $K = k_* \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2$ – коэффициенты проницаемости, м², k_* – эмпирическая константа, м², φ_5 – пористость торфа; μ – коэффициент динамической вязкости, Н·с/м²; p – давление газообразных продуктов в порах, Па; M – молекулярная масса многокомпонентной газовой фазы, кг/моль; g – ускорение свободного падения, м/с²; индексы 0, e соответствуют величинам, характеризующим источник зажигания и внешнюю среду; h и L – толщина и радиус исследуемого торфяного пласта, м; T_s, T_e – температура подстилающей поверхности и окружающей среды, К; $T_H, p_H, \rho_H, c_{\alpha H}$ – температура, давление, плотность и массовая концентрация α -компоненты в начальный момент времени в слое торфа; V_0 – объем источника тепла, м³; S_0, S_e – площадь основания и внешняя поверхность источника, м²; c_0, ρ_0 – удельная теплоемкость и плотность источника тепла, Дж/(кг·К), кг/м³; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен слоя торфа с внешней средой и подстилающей поверхностью, Вт/(м²·К); для пористой поверхности коэффициент теплоотдачи вычислялся по формуле $\bar{\alpha}_1 = \alpha_1 [1 - k_1(\rho_5 \varphi_5 \nu)_w]$, k_1 – эмпирическая константа, ν_w – скорость уноса газообразных продуктов из слоя торфа через верхнюю поверхность, которая вычислялась по эмпирической формуле, м/с; q_e – тепловой поток от источника зажигания в окружающую среду, Вт/м²; $q_e = \alpha_0 (T - T_e) + \varepsilon_0 \sigma (T^4 - T_e^4)$; α_0 – коэффициент теплоотдачи, характеризующий конвективный теплообмен теплового источника с внешней средой, Вт/(м²·К); $\varepsilon_0 \sigma T_0^4, \varepsilon_0 \sigma T_e^4$ – слагаемые, описывающие по закону Стефана–Больцмана лучистый теплообмен источника зажигания с окружающим его воздухом, Вт/м²; ε_0 – степень черноты источника; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_0 – начальная температура источника зажигания, К; T_e – температура воздуха во внешней среде К; $\beta_1 = \alpha_{1m}/c_{p5}$ – коэффициент массообмена слоя торфа с внешней средой, кг/(м²·с); $\alpha_{1m} = \alpha_1 L_m$, $0 \leq L_m \leq 1$; L_m – эмпирическая константа,

аналог эффективного числа Льюиса–Семенова (параметр подобия процессов тепло – и массообмена).

Рассматриваемая математическая модель условий возгорания и горения торфа решается с помощью итерационно-интерполяционного метода совместно с методом Ньютона. Исходным вариантом для сравнительного анализа с другими вариантами решений выбрана задача с торфом влажностью 15%. Данная задача решалась при следующих условиях: $\alpha = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $(Bi=0,69)$, $\varepsilon_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$, $W = 15\%$, $\varphi_{1H} = 0,043$, $\varphi_{2H} = 0,009$, $\varphi_{5H} = 0,948$, источник тепла цилиндрический диаметром 0,05 м и высотой 0,05 м. При других вариантах численных задач некоторые коэффициенты изменялись, что соответствовало изменению рассматриваемых условий в вышеприведенной системе (для этих случаев они указаны в подрисуночных подписях).

Период задержки зажигания определялся из условия смены знака теплового потока в торф, что соответствует изменению знака производной dT/dt в граничных условиях (8). Из рис. 5 можно видеть, что угол касательной к кривой $T(t)$, характеризующий эту производную, от начального момента времени до момента t_3 убывает, после момента t_3 угол касательной резко возрастает, что и соответствует смене знака множителя dT/dt в уравнении (8).

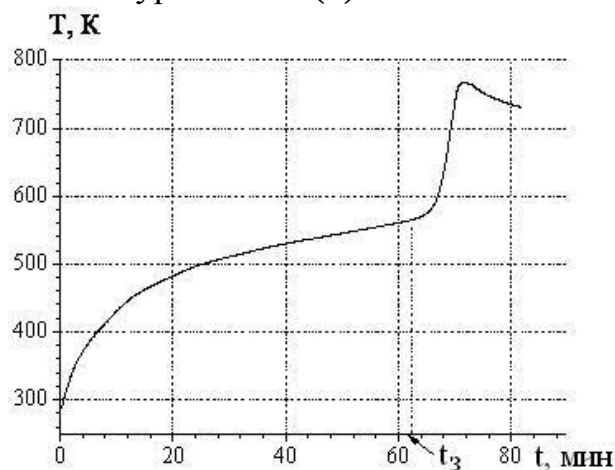


Рис. 5. Изменение со временем температуры торфа на глубине $0,8 \cdot 10^{-3}$ м

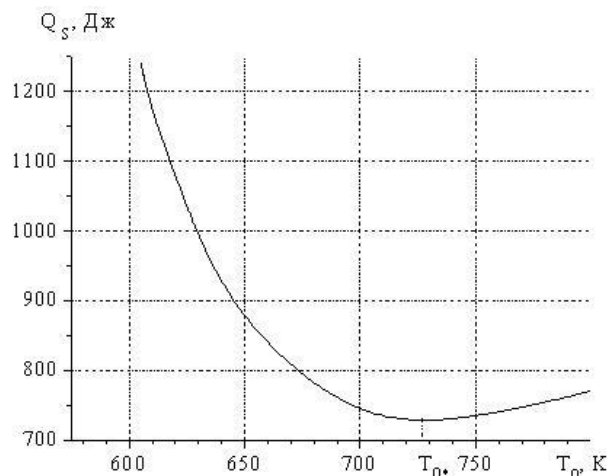


Рис. 6. Суммарное количество тепла, поступившее в слой торфа до момента t_3 , при разных значениях начальной температуры источника.

Зависимость от начальной температуры суммарного количества тепла $Q_s(T_0)$, поступившего в торф, полученная при тех же параметрах, имеет явный минимум при T_{0*} (рис. 6). T_{0*} как наименьшая температура является условием возникновения очага горения с наименьшими затратами энергии источником зажигания. Исходя из проведенных расчетов, можно констатировать, что при $T_0 < T_{0*}$ темп нагрева сравнительно мал, и пока создастся очаг горения в торфе, прогретый слой будет больше того, который необходим для поддержания горения (дополнительное расходование энергии). При $T_0 > T_{0*}$ темп нагрева достаточно большой и около источника

зажигания сгорает узкая полоса торфа, но очаг горения сразу не создается. Поэтому потребуется дополнительно подводить тепло, пока не прогреется область, необходимая для зажигания и поддержания горения.

Интегрирование теплового потока, поступающего от источника в торф, по площади основания S_0 и по времени от 0 до t_3 , дает количество тепла, поступившее в торф за время прогрева. Разделив поступившее количество тепла на площадь основания и на интервал времени прогрева, получим усредненный по площади тепловой поток от источника ($\bar{q}_c$). При этом под величиной $\bar{q}_c$ понимается минимальный уровень энергозатрат, при котором нагретое тело способно воспламенить торф. Используя таким способом определяемую величину $\bar{q}_c$, получены ее зависимости от периода времени задержки зажигания (рис. 7). При $\bar{q}_c < 171 \text{ Вт/м}^2$, что соответствует начальной температуре источника $T_0 = 605 \text{ К}$, торф не воспламеняется. При увеличении теплового потока от этой величины в три раза период задержки зажигания уменьшается более чем в 5 раз – с 62 до 12 минут. На рис. 8 приведена зависимость времени зажигания от начальной температуры теплоизолированного от внешней среды источника.

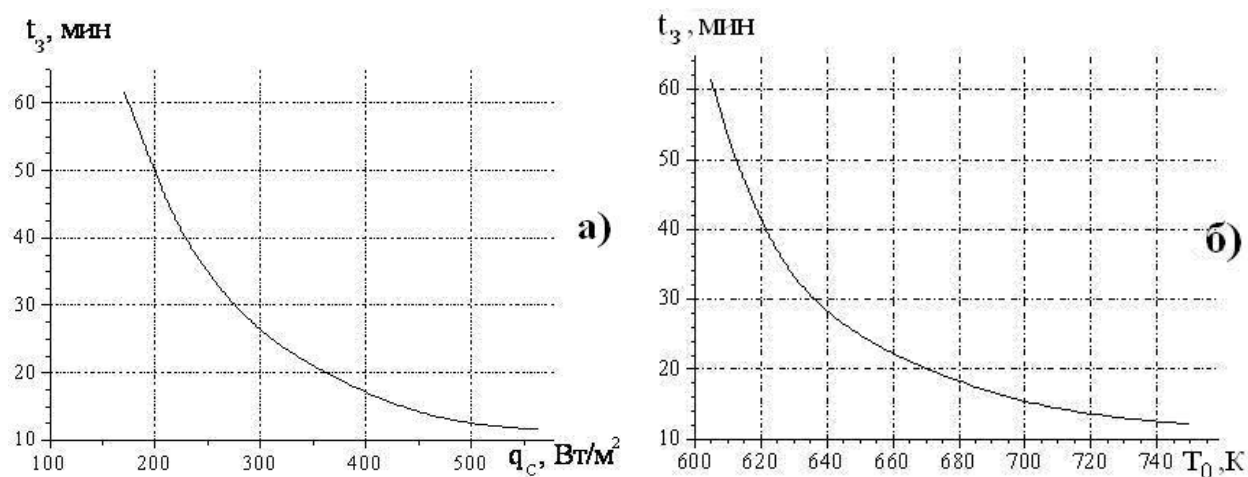


Рис. 7. Зависимость периода задержки зажигания теплоизолированным источником: а) от усредненного теплового потока источника; б) от начальной температуры источника.

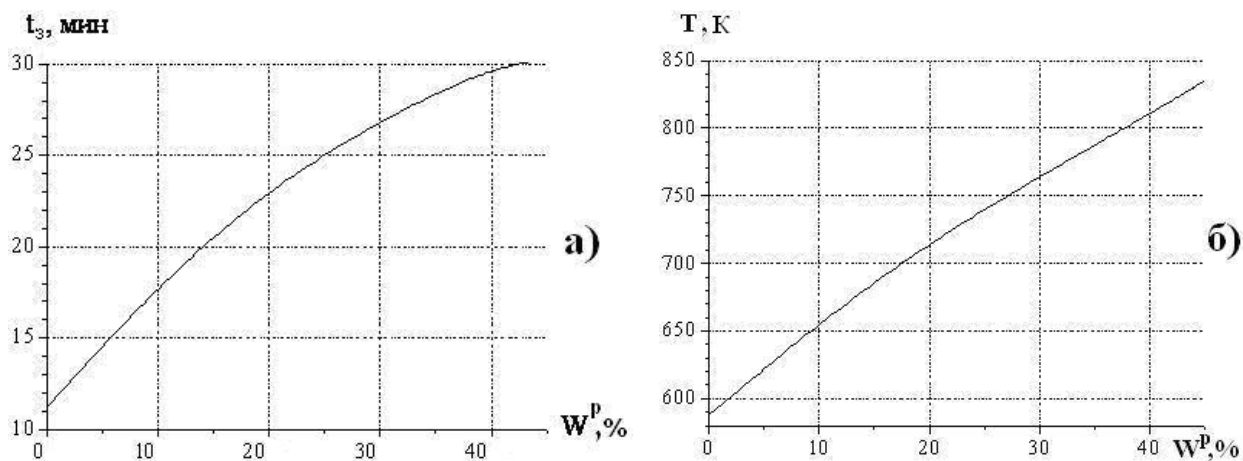


Рис. 8. Влияние влажности торфа на период задержки зажигания (а) и начальную температуру источника (б) при $\alpha_0 = 4,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, $\alpha = 14,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ($Bi=0,5$), $\varepsilon_0 = 0,1$.

Численные исследования показывают, что параметры $\bar{q}_c$, а также t_3 (рис. 8а) и T_0 (рис. 8б), характеризующие критические условия зажигания торфа от внешнего нагретого источника, однозначно связаны с влажностью торфа и увеличиваются по мере ее возрастания. Этот факт позволяет рассматривать контроль влажности и воздействие на ее величину как действенное средство предотвращения возгорания залежей торфа и торфяных штабелей.

Исследуемая математическая модель позволяет получать данные о возникновении и развитии очага горения при различных условиях теплообмена источника с окружающей средой, торфом и при различных параметрах самого источника (мощность, степень черноты и т.д.). Используя полученные с помощью численных расчетов данные, построены температурные поля в слое торфа. Пример, показывающий изотермы торфяного массива при наличии очага горения для одного из расчетных вариантов влажности, изображенный на рис. 9, свидетельствует, что воспламенение происходит по оси симметрии источника тепла на некотором расстоянии от основания (рис 9а). Изменение условий теплообмена системы с окружающей средой влияет на размер, местоположение и скорость продвижения очага горения (рис. 9б и 9в).

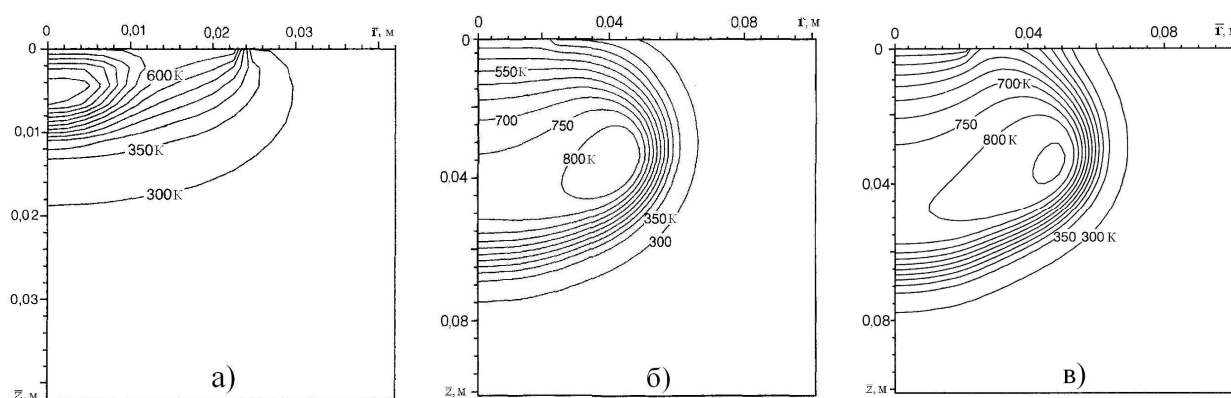


Рис. 9. Местоположение очага горения в массиве торфа в различных фазах: а) $t=20$ мин., $\alpha = 20$ Вт/(м²·К); б) $t=180$ мин., $\alpha = 14,5$ Вт/(м²·К); в) $t=180$ мин., $\alpha = 2$ Вт/(м²·К).

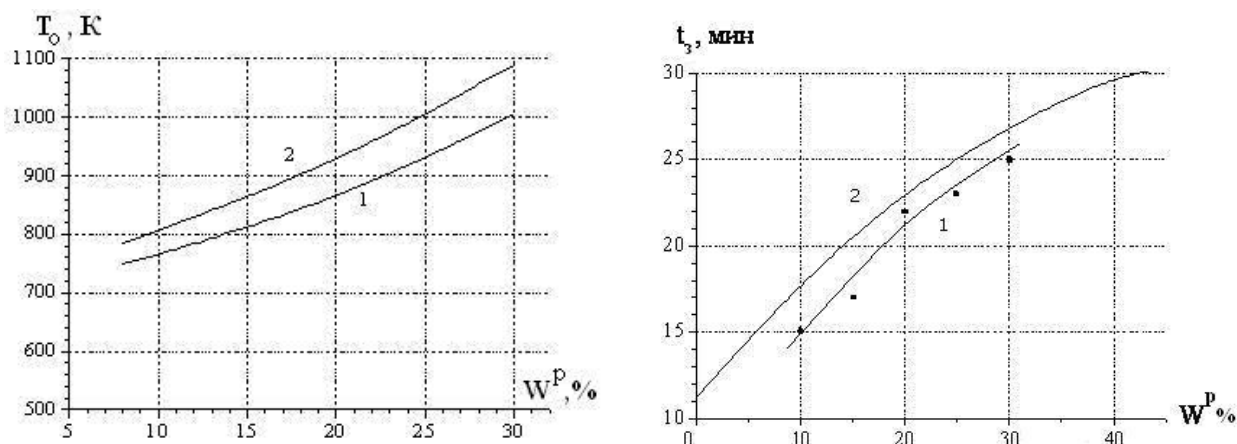


Рис. 10. Зависимость начальной температуры источника (а) и периода задержки зажигания (б) от влажности торфа при $\alpha_0 = 4,2$ Вт/(м²·К), $\alpha = 14,5$ Вт/(м²·К): 1—эксперимент, 2—численные расчеты.

Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований (рис. 10) показывает удовлетворительную сходимость по основным параметрам процесса зажигания: максимально установленное отклонение по температуре зажигания не превысило 7,3%, а по времени зажигания – 7,4%.

Анализ результатов выполненных экспериментов, а также проведенных численных расчетов позволяет сформулировать основные положения физической модели зажигания слоя торфа локальным источником тепла.

Источник тепла при попадании на поверхность торфа в условиях залежи либо в штабелях при складировании охлаждается за счет теплоотвода как в слой торфа, так и в окружающую среду. В результате температура источника падает и соответственно снижается тепловой поток в зону реакции. Процесс остывания источника является существенно нестационарным, т.к. при начавшемся пиролизе торфа выделяются горячие продукты газификации и пары внешней составляющей влажности торфа, которые создают вокруг источника тепловую завесу или изолирующий слой, что существенно отличает его от аналогичных механизмов при лучистом нагреве. Как показали эксперименты, решающее значение при возгорании торфа имеет его влажность и содержание кислорода в зоне реакции. Таким образом, можно полагать, что если рассматриваемое явление имеет место при прохождении верхового пожара (как в большинстве случаев), т.е. при общей нехватке кислорода, для возгорания потребуется значительно большее время, необходимое для установления стационарного воздухообмена в слое торфа. Однако, учитывая значительность конвективных воздушных потоков в зоне горения и остаточного тления горючих материалов, а также объемы выделяющихся дымовых газов, в некоторых случаях доокисляющихся (CO и т.д.), источник нагрева может остыть раньше, чем концентрация кислорода достигнет необходимого значения. Этим можно объяснить случаи лесных пожаров, не приводящие к возгоранию залежей торфа.

В подтверждение изложенных представлений можно привести ранее опубликованные другими исследователями результаты численного моделирования, в которых были найдены условия распространения торфяного пожара применительно к отсутствию притока воздуха из окружающей среды, что может происходить в торфах малой плотности (малой степени разложения), обладающих большим количеством свободного кислорода в порах. Данное явление имеет место в реальности: непотушенные торфяные пожары с наступлением зимы при соблюдении вышеописанных условий, а также низкой влажности торфа могут заглубляться в его массив и в некоторых случаях оставаться там весь зимний период, а с наступлением весны снова выходить на поверхность.

Установлено, что при некотором значении влажности (в проведенных исследованиях она составляла 35...40%) торф от внешнего теплового источника не загорается. А в диапазоне меньше критической величины влажность играет определяющую роль в теплофизических процессах, обеспечивающих тепловую подготовку зажигания. При ее увеличении в

пределах данного диапазона наблюдается равномерный прогрев большего объема торфа, что объясняется миграцией паров воды в торфяном массиве.

Неизотропность массива торфа также сказывается на процессе его зажигания и горения. Во-первых, очаг горения образуется в области с наименьшей теплопроводностью, где тепло аккумулируется. Во-вторых, образовавшаяся зона горения движется в дальнейшем по пути наименьшего сопротивления, т.е. по траектории с наибольшей теплопроводностью. В случае наличия на пути очага горения предмета (области), отличающейся по теплофизическим свойствам (например, древесный фрагмент), возможно образование нового локального источника зажигания. При этом процесс воспламенения будет схож с первоначальным, за исключением изменившихся условий теплообмена системы «область возгорания – торф» с окружающей средой. Как показали численные расчеты, при распространении очага горения в указанной системе главную роль играет ее теплообмен с окружающей средой. При увеличении коэффициента теплоотдачи между торфом и приземным слоем воздуха очаг горения заглубляется, минимизируя тепловые потери. Напротив, при уменьшении коэффициента теплоотдачи с поверхности массива наблюдается обратный процесс, который можно объяснить прогревом слоя торфа над очагом горения за счет конвективных потоков дымовых и пиролизных газов. При минимальной теплоотдаче поверхностного слоя торфа в окружающую среду область горения поднимается вслед за горячими газами.

Совокупность результатов исследований позволяет обоснованно вырабатывать практические рекомендации по предотвращению и ликвидации возгораний торфа при его использовании в технологиях, связанных с добычей, хранением и переработкой. Исключая из рассмотрения кардинальные меры, препятствующие привнесу внешних источников зажигания, что в значительной мере связано с «человеческим фактором», наиболее эффективным, исходя из физической модели, являются пути воздействия, направленные на характеристики влажности, уплотненности и теплового режима торфяного массива. Некоторые мероприятия, например, прикатывание штабелей тяжелой техникой, оснащение ее средствами искроулавливания выхлопных газов и пр., известны как найденные из практического опыта. В этом случае по итогам проведенных исследований можно систематизировать и дополнять их на единой теплофизической основе, что позволяет исключать противоположно направленные и получать более качественные результаты.

При разработке технологических регламентов использования торфа главенствующим принципом профилактики возгорания должна быть система контроля и управления влажностью: разделение единого массива на штабели (участки) по влажности; соответствующий график их расходования; тепловизионное обследование поверхности; выявление участков локального повышения температуры; контрольные отборы проб и др. Меры ликвидации возгорания должны предусматривать наряду с прочими изменение условий тепломассообмена поверхности штабелей с целью предотвращения

заглубления очагов горения, локализации и вывода их на поверхность (минимизация теплоотвода с использованием негорючих теплоизоляционных покрытий мест проявления очагов, прогнозирование их распространения методами моделирования).

Итогом выполненных в настоящей работе исследований являются следующие основные **результаты и выводы**.

1. Экспериментальным путем для массива торфа в зависимости от влажности и условий теплообмена определены параметры зажигания, инициированного внешним тепловым источником, которые позволили реализовать численные исследования процесса зажигания и горения с использованием математической модели.

2. Экспериментально определены коэффициенты теплоемкости и теплопроводности торфа, кокса и золы в диапазоне температур их пребывания в массиве торфа в процессе образования очагов горения, а также значения истинных плотностей для этих веществ. Установлено, что среднюю истинную теплоемкость золы и кокса в пределах температур 273...673 К и 273...473 К соответственно можно считать постоянной и равной для золы 884,9 Дж/(кг·К), для кокса – 706,7 Дж/(кг·К), а теплоемкость торфа с изменением температуры 273...373 К увеличивается с 1230 Дж/(кг·К) до 1650 Дж/(кг·К). В рассматриваемом диапазоне температур теплопроводность торфа и кокса в среднем равна соответственно 0,493 Вт/(м·К) и 0,398 Вт/(м·К), для золы данная характеристика является возрастающей с 0,5 до 0,79 Вт/(м·К). Найденные значения использованы в базе данных для уточнения математической модели.

3. Установлено, что влажность торфа имеет решающее значение для зажигания торфяного массива, существования и развития в нем очагов горения. С повышением влажности размеры очага горения уменьшаются при сохранении запаса тепловой энергии для последующего распространения. Выявлено наличие критического для процесса зажигания значения влажности торфа, при котором тепловая энергия затрачивается лишь на испарение влаги. В проведенных исследованиях такой величиной является $W^p=35\%$.

4. Условия теплообмена системы «источник зажигания – массив торфа» с окружающей средой влияют на распространение очага возгорания. Увеличение тепловых потерь в окружающую среду приводит к заглублению очага горения в массиве торфа, а при их минимизации очаг горения способен полностью выходить на поверхность.

5. Выявленные обобщенные закономерности сложных теплофизических процессов, базирующиеся на использовании методов численного моделирования в сочетании с экспериментальным сопровождением, являются развитием физической модели тепломассопереноса при зажигании и распространении горения в массиве торфа и позволяют обосновывать технологические регламенты при использовании торфа, направленные на предотвращение и устранение аварийных ситуаций.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Зажигание торфа внешним локальным источником тепла //Пожаровзрывобезопасность, 2009. - т.18 - № 4. – с. 13-18.
2. Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Исследование механизма и минимальной энергии зажигания торфа источником тепла// Пожарная безопасность, 2009. - № 4. – с. 77-83.
3. Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Теплофизические свойства торфа //Инженерная физика, 2009. - № 12. – с. 42-46.
4. Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Влияние тепломассопереноса на воспламенение торфа //Инженерная физика, 2009. - № 12. - с. 47-51.
5. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Зажигание торфа локальным источником тепла /Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири. Физика и химия торфа, продукты переработки // Материалы международной научно – практической конференции. – Томск: Изд. «Ветер», 2009. – с. 254-257.
6. Кулеш Р.Н. Экспериментальное исследование условий зажигания торфяного пласта / Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири. Физика и химия торфа, продукты переработки // Материалы международной научно – практической конференции. – Томск: Изд. «Ветер», 2009. – с. 250-253.
7. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Исследование критических условий воспламенения торфяника //Всероссийский семинар кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике - Новосибирск: Наука, 2009. – с. 57-58.
8. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Воспламенение и горение торфяного пласта //Горение твердого топлива: VII Всероссийская конференция с международным участием - Новосибирск: Изд. ИТ СО РАН, 2009. – с. 198-204
9. Кулеш Р.Н., Николаева В.И., Раков Ю.Я. Исследование теплофизических свойств торфа Бакчарского месторождения Томской области //Теплофизические основы энергетических технологий: Материалы региональной научно-практической конференции - Томск: Изд. ТПУ, 2009. – с. 268-274.
- 10.Кулеш Р.Н., Ефремов А.Н., Зобов А.Б. Экспериментальное определение зажигания торфа от внешнего теплового источника //Энергетика: экология, надежность, безопасность: XI Всероссийский студенческий научно-технический семинар - Томск: Изд. ТПУ, 2009. – с. 31-35.
- 11.Kulesh R.N., Budkova S.S. Research of peat ignition conditions with change of different physical characteristics //Modern Technique and Technologies - Tomsk: TPU Press, 2009. – p. 183-185.