

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОРФА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

В. Т. Кузнецов, Е. Л. Лобода

Томский государственный университет, 634050 Томск, loboda@mail.tsu.ru

Проведено экспериментальное исследование воспламенения торфа разных сортов, характерных для болот Томской области и болот в районе г. Эдинбург (Великобритания), под воздействием потока лучистой энергии. Определены время экспозиции и плотность энергии, необходимые для воспламенения различных сортов торфа; характерная температура поверхности воспламенения и горения торфа; область лучистых потоков, в которой наблюдается переход от пламенного к тлеющему режиму воспламенения торфа.

Ключевые слова: торф, горение, излучение, режимы и энергия воспламенения.

ВВЕДЕНИЕ

Торфяные пожары являются довольно распространенным природным явлением [1, 2]. Тушение таких пожаров — трудоемкая и сложная задача. Например, значительная часть севера Западной Сибири покрыта болотами, на территории которых проходят нефте- и газопроводы. Аварии и техногенные катастрофы на трубопроводах зачастую сопровождаются горением углеводородов, интенсивное тепловое излучение от которых может вызывать торфяные пожары. Торфяники присутствуют и в других климатических зонах нашей планеты. Например, они распространены на территории Великобритании и Франции. И хотя климатические особенности этих регионов отличаются друг от друга, проблема возникновения торфяных пожаров остается актуальной в обеих странах. Торфяные пожары в большем числе случаев возникают как следствие природных пожаров или техногенных катастроф.

Под действием теплового излучения происходят высушивание слоя торфа и его возгорание. В зависимости от интенсивности теплового излучения процесс воспламенения протекает в пламенном или тлеющем режиме. Пламенный режим воспламенения характеризуется интенсивной газификацией и выгоранием прогретого слоя, далее в зависимости от плотности и длительности воздействия теплового потока воз-

можны прекращение пламенного режима горения или его переход в режим тлеющего горения.

В работах [3–7] экспериментально и теоретически исследовался процесс воспламенения лесных горючих материалов (веточек, опада хвой, листьев) при природных и техногенных лесных пожарах. В [8] сделаны оценки экологических последствий воздействия теплового излучения от ядерных взрывов на биогеоценозы.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований по воспламенению слоя торфа. В качестве исследуемых образцов взят торф из болот в районе пос. Плотниково (образец № 1), пос. Белый Яр (образец № 2) Томской области и из болот в районе г. Эдинбург, Великобритания (образец № 3). Образцы воспламенялись потоком лучистой энергии. При этом варьировались интенсивность излучения, его продолжительность и начальное влагосодержание торфа. Определяли время экспозиции и плотность лучистого потока для воспламенения торфа в различных режимах (пламенный режим горения и тление), а также динамику изменения температуры поверхности торфа в момент воспламенения и в процессе горения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые образцы пористой среды — торфа — отличались ботаническим составом (табл. 1), степенью разложения (R)¹,

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-01-91054 НЦНИ_а) и Роснауки (гос. контракт № 02.740.11.0674).

¹Степень разложения торфа [9] — относительное содержание в общей массе торфа продуктов распада растительных тканей, утративших клеточную структуру.

Таблица 1

Ботанический состав и характеристики образцов торфа

Номер образца	Тип торфа	h , м	Состав растительных остатков	Содержание, %	R , %	Зольность, %
1	Травяно-сфагновый переходный	$0 \div 0.35$	Кора и древесина сосны	25	35	7.5
			Кора и древесина березы	5		
			Кора карликовой березки	10		
			Пушица	30		
			Осока волосистоплодная	10		
			Хвощ	5		
			Сфагнум магелланский	10		
			Сфагнум центральный	5		
2	Шейхпериево-сфагновый переходный	$0.4 \div 0.5$	Сфагнум балтийский	65	10.5	3.33
			Сфагнум узколистый	10		
			Пушица	10		
			Шейхперия	10		
			Корешки вересковых кустарников	5		
3	Кустарничково-сфагновый верховой	$0 \div 0.2$	Сфагнум магелланский	60	42	1.83
			Клюква болотная	25		
			Древесина сосны и березы	Единичное		
			Сфагнум красноватый	5		
			Шейхперия	10		
			Осока (<i>Carex rostrata</i>)	Единичное		

зольностью² и влагосодержанием. Для исследования брали вершинные слои торфа с глубины залегания $h \leq 0.5$ м. Торф предварительно подвергали сушке в сушильном шкафу ШСП-0,5-200 при температуре 373 К. Для испытаний вырезали отдельные образцы с сохранением первоначальной структуры торфа. Образцы помещали в термоизолированный стакан диаметром 3 см и высотой 5 см. Размер стакана обусловлен характерными размерами установки, а термоизоляция исключала стек тепла в окружающую среду. Плотность образцов приближалась к естественной и варьировалась в пределах $\rho = 157 \div 172$ кг/м³. Массу образцов определяли на электронных весах AND HL-400 с точностью 0.1 г, влагосодержа-

ние образцов — при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0.01 % (для исследуемых образцов оно варьировалось в пределах $w = 0 \div 29.05$ %). Температуру воздуха ($T_e = 295 \div 297$ К), его относительную влажность ($\varphi = 20 \div 50$ %) и атмосферное давление ($p_e = (9.94 \cdot 10^4) \div (1.02 \cdot 10^5)$ Па) контролировали при помощи метеостанции Meteoscanner RST01923.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Воспламенение производилось на установке радиационного нагрева «Уран-1» [10], в которой источником лучистой энергии служила ксеноновая лампа высокого давления ДКСР-10000 (10 кВт). Лучистый поток от лампы фокусировался на поверхности исследуемого образца, диаметр сфокусированного потока составлял около 2 см. Изменение интенсивности излучения в пятне диаметром 2 см не превышало 13 %. Распределение интенсивности излучения

²Зольность — масса твердого неорганического остатка (зола), образующегося после полного сгорания образца горючего вещества (угля, торфа и др.). Зольность образцов определялась по ГОСТ 11306-83.

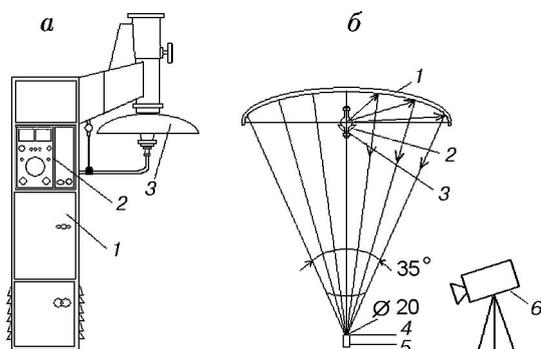


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
a — конструктивное выполнение оптической печи типа «Уран-1»: 1 — блок питания, 2 — пульт управления, 3 — излучатель; *б* — оптический излучатель: 1 — отражатель, 2 — контротражатель, 3 — лампа, 4 — рабочее пятно, 5 — термоизолированный стакан с образцом торфа, 6 — тепловизор

по площади пятна определяли фотоэлектрическим методом с использованием световода из стекловолоконного жгута диаметром 2 мм марки ГОЖВ-Б-2-25 и фотодиода ФД-К-155. Сигнал с фотодиода регистрировался шлейфовым осциллографом Н-117/1. Световод перемещали по диаметру пятна во взаимно перпендикулярных направлениях. Кривые распределения интенсивности излучения имели максимум в центре пятна и достаточно плавно снижались к периферии. Время экспозиции потока излучения в эксперименте задавали с помощью дискового затвора, который обеспечивал трапециевидную форму импульса. Время раскрытия (закрытия) затвора составляло 4 % от времени экспозиции. Начало и конец экспозиции, а также момент появления продуктов газификации и пламени фиксировали тепловизором JADE J530SB при частоте съемки 100 кадр/с, показания которого дублировали фотоэлектрической системой и записывали на шлейфовый осциллограф Н-117/1. Плотность лучистого потока в месте расположения исследуемых образцов перед каждой серией опытов и для контроля в ходе экспериментов данной серии измерялась калориметром. Калориметр представлял собой медный диск диаметром 10 мм, толщиной 3 мм, с термопарой, зачеканенной по центру диска на глубину 1.7 мм. Приемная поверхность калориметра зачернена ламповой копотью. Погрешность измерения интенсивности излучения не превышала 10 %. Плотность лучистого потока изменяли в пределах $q =$

$(1.6 \cdot 10^5) \div (1.52 \cdot 10^6)$ Вт/м². Температура поверхности образца фиксировалась тепловизором JADE J530SB с погрешностью измерений, не превышающей 1 %. В экспериментах использовали дисперсионный оптический фильтр со спектральным интервалом 2.5 ÷ 2.7 мкм, позволяющий измерять температуру в диапазоне 763 ÷ 1773 К. Использовали калибровки завода-изготовителя.

В зависимости от режима воспламенения торфа (тлеющий или пламенный) время воспламенения определяли по критерию «да-нет» [11] или по появлению пламени. В настоящей работе, в отличие от критерия «да-нет» из работы [11], в качестве времени воспламенения принимали минимальное время экспозиции потока излучения, которое приводило к развитию горения хотя бы в одном случае, т. е. после окончания облучения за образцом наблюдали в течение 20 мин и если горение торфа сохранялось, то считалось, что произошло возгорание торфа. Соответственно в качестве критического значения плотности энергии воспламенения по методу «да-нет» принималось минимальное значение плотности энергии во всей серии экспериментов. Такой подход усиливает показатель пожароопасности объекта. В случае тлеющего режима горения в качестве времени задержки принимали минимальное время экспозиции, приводящее к устойчивому горению торфа [12, 13], а в случае пламенного режима горения — промежуток времени от начала экспозиции до момента появления пламени. Момент начала пламенного режима горения торфа фиксировался тепловизором. Распространение фронта горения контролировали визуально и при помощи тепловизора.

Суммарные относительные погрешности определения параметров: $\delta w/w \leq 3.3$ %, $\delta m/m \leq 1.2$ %, $\delta p_e/p_e \leq 6.0$ %, $\delta T_e/T_e \leq 5.3$ %, $\delta \varphi/\varphi \leq 2.5$ %, $\delta t/t \leq 4.3$ %, $\delta q/q \leq 10$ %. Доверительные интервалы рассчитывали по результатам 3 ÷ 10 опытов с доверительной вероятностью 0.95. Время задержки для пламенного режима определено по 3 ÷ 5 опытам, а время задержки при воспламенении в режиме тления — по 10 опытам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 можно наблюдать, как проходит процесс воспламенения торфа. На тепловизионных снимках отчетливо видны все фа-

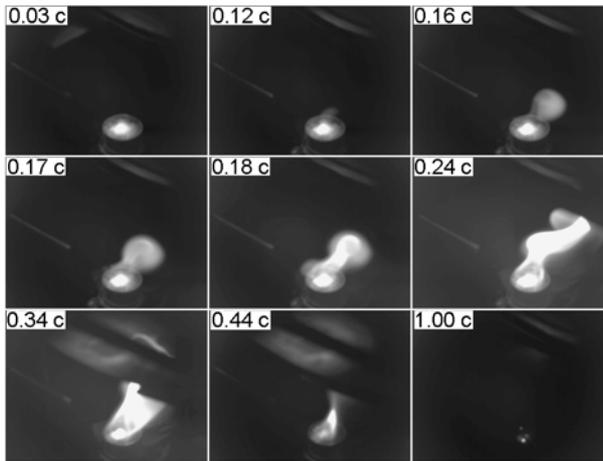


Рис. 2. Тепловизионные снимки характерных этапов воспламенения образца № 1 при $w = 0$, $q = 7.1 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$, $t_e = 0.34 \text{ с}$, $t_f = 0.18 \text{ с}$

зы: нагрева, газификации, пламенного горения, исчезновения пламенного горения при прекращении подачи энергии извне и тления торфа. Наблюдаемое на рис. 2 отклонение продуктов газификации и пламени вызвано незначительным движением воздуха вследствие работы системы вентиляции.

В табл. 2 представлены критические значения плотности энергии воспламенения торфа, определенные по появлению пламени и пламенного режима горения (E^*) и по методу «да-нет» (E). За 20 мин фронт горения успевал пройти на глубину до $2 \div 2.5$ см. Кроме того, в таблице приведены времена задержки воспламенения, установленные по появлению пламени (t_f) и по методу «да-нет» (t_e). Следует отметить, что энергию E^* определяли по средней величине t_f , а E — по наименьшему значению t_e . Видно, что на энергию воспламенения торфа оказывают влияние интенсивность излучения и влажность образцов. Существенное влияние влажности торфа на минимальную энергию зажигания отмечали авторы работы [2].

В экспериментах было выявлено (см. табл. 2), что при влагосодержании образца № 1 $w = 29 \%$ происходило существенное увеличение E . Это связано с тем, что для устойчивого тления образца необходимо его высушивание. Следует отметить, что при нагревании образца лучистым потоком плотностью $q > 1.2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ устойчивого горения не наступало, наблюдался лишь ожог поверхности образца. Иными словами, при больших значениях плотности лучистого потока происходит га-

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Номер образца	$w, \%$	$q, 10^4 \text{ Вт/м}^2$	$t_f, \text{ с}$	$E^*, 10^4 \text{ Дж/м}^2$	$t_e, \text{ с}$	$E, 10^4 \text{ Дж/м}^2$
1	0	21	—	—	4.65 ± 0.05	97.65
	0	37	0.39 ± 0.13	14.43	0.9 ± 0.02	32.6
	0	39	0.36 ± 0.01	14.04	0.82 ± 0.01	31.59
	0	66.7	0.18 ± 0.01	12.01	0.26 ± 0.01	16.68
	0	71	0.17 ± 0.01	12.07	0.25 ± 0.01	17.04
	8.6	40	0.81 ± 0.07	32.4	0.84 ± 0.01	33.2
	8.6	74.1	0.21 ± 0.01	15.56	0.39 ± 0.02	27.42
	8.6	79.9	0.21 ± 0.01	15.98	—	—
	29	79.9	0.62 ± 0.11	49.54	1.35 ± 0.65	55.93
	29	152	0.2 ± 0.04	30.4	—	—
2	0	37	0.36 ± 0.02	13.32	1.27 ± 0.02	46.25
	0	73	0.18 ± 0.01	13.14	—	—
3	0	71	0.24 ± 0.02	17.04	0.63 ± 0.07	39.76
	0	152	0.19 ± 0.02	13.49	0.40 ± 0.05	53.2

зификация верхних слоев торфа, сопровождающаяся вынужденным для торфа пламенным режимом горения, но при этом образец не прогревается на необходимую для устойчивого тления торфа глубину. Для образцов № 2 при значениях лучистого потока $q > 7 \cdot 10^5$ Вт/м² наблюдался лишь пламенный режим горения, но тление не наступало. Это, по-видимому, связано с существенно меньшей степенью разложения торфа, т. е. при больших потоках происходит интенсивный пиролиз органического вещества на поверхности, в результате чего образец не прогревается на достаточную для устойчивого тления глубину. Наблюдалось лишь появление ожога поверхности.

Следует отдельно отметить, что при облучении образца № 3 лучистым потоком плотностью $q = 7.1 \cdot 10^5$ Вт/м² пламенный режим горения наступил лишь в трех случаях из десяти экспериментов, а во всех экспериментах, где наблюдалось тление, оно носило затухающий характер и постепенно прекращалось, хотя и поддерживалось горение в течение достаточно длинного отрезка времени. Поэтому можно считать, что стационарное горение образца № 3 в целом не реализовано.

Очевидно, что пламенный режим горения торфа является вынужденным и достигается только при постоянном подводе энергии извне, достаточной для поддержания интенсивного пиролиза торфа. Поэтому наибольший интерес в практическом смысле имеют критические значения величин E и t_e .

Кроме того, для образца № 1 было определено максимальное значение плотности лучистого потока $q = 2.1 \cdot 10^5$ Вт/м², при котором не наступает режим пламенного горения торфа, но достигается устойчивый режим тлеющего горения при $t_e = 4.65$ с.

Важной характеристикой процесса воспламенения и горения является температура поверхности. На рис. 3 представлены зависимости температуры поверхности образца торфа № 1 от времени при различных интенсивностях подвода энергии. Кривые 1 и 3 соответствуют экспериментам, в которых наступало тление образца торфа, при этом в эксперименте, соответствующем кривой 1, достигался режим пламенного горения при воздействии лучистой энергии. В эксперименте, соответствующем кривой 2, режим пламенного горения реализовывался, но тление не наступило ввиду недостаточного времени экспозиции. В экс-

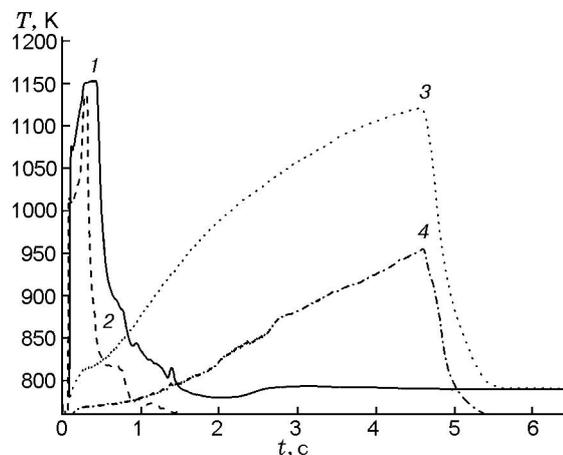


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности образца № 1 от времени:

1 — $q = 7.1 \cdot 10^5$ Вт/м², время экспозиции $t_f = 0.32$ с (тление); 2 — $q = 7.1 \cdot 10^5$ Вт/м², $t_f = 0.25$ с (горение не наступает); 3 — $q = 2.1 \cdot 10^5$ Вт/м², $t_f = 4.65$ с (тление); 4 — $q = 1.6 \cdot 10^5$ Вт/м², $t_f = 4.65$ с (горение не наступает)

риментах, соответствующих кривым 3 и 4, режим пламенного горения отсутствовал, а в эксперименте, соответствующем кривой 4, не наблюдалось тления образца ввиду недостаточной интенсивности подведенной энергии.

На рис. 3 видно, что до момента появления режима пламенного горения торфа идет повышение температуры поверхности торфа, сопровождающееся интенсивным пиролизом. После воспламенения продуктов пиролиза наблюдается еще некоторое повышение температуры поверхности торфа до момента прекращения подачи энергии. После этого температура поверхности достаточно интенсивно снижается, пламенный режим горения исчезает, что связано с отсутствием достаточного количества продуктов пиролиза, и горение переходит в режим тления с температурой около 790 К, что согласуется с результатами [2, 14, 15].

Следует отметить, что на рис. 3 отсутствует начальный этап нагрева. Это обусловлено наличием нижнего предела измерений при используемом дисперсионном фильтре. Кроме того, для изучения влияния отражения излучения лампы от поверхности образца на измеряемую температуру нами были проведены измерения температуры кипящей воды под действием излучения. Поскольку в этом эксперименте не использовался дисперсионный фильтр, излучение в более широком диапазоне длин волн

могло воздействовать на чувствительный элемент тепловизора. Однако минимальные значения температуры в исследуемой области оказались удовлетворительными — 370 ± 15 К, что дает основание считать незначительным влияние отражения излучения лампы на показания при использовании дисперсионного фильтра с достаточно узким спектральным интервалом. Тем не менее следует отметить, что нельзя полностью исключить влияние излучения лампы экспериментальной установки на показания тепловизора, это может привести к некоторому превышению измеренной температуры поверхности торфа в момент облучения образца по сравнению с истинной температурой. Для оценки этого эффекта были проведены дополнительные эксперименты с нагревом образца CO_2 -лазером, спектральный интервал излучения которого находится за пределами диапазона пропускания дисперсионного оптического фильтра.

На рис. 4 приведено сравнение изменения температуры поверхности торфа (образец № 1 при $w = 0$) при воздействии лучистым потоком от установки «Уран-1» (кривая 1) и CO_2 -лазера (кривая 2). Для образца № 1 появление пламени на установке «Уран-1» при $q = 1.42 \cdot 10^6$ Вт/м² достигалось при времени экспозиции $t_f = 0.06 \div 0.07$ с, на CO_2 -лазере при $q = 1.5 \cdot 10^6$ Вт/м² (мощность лазера измерялась при помощи ИМО-2 с погрешностью

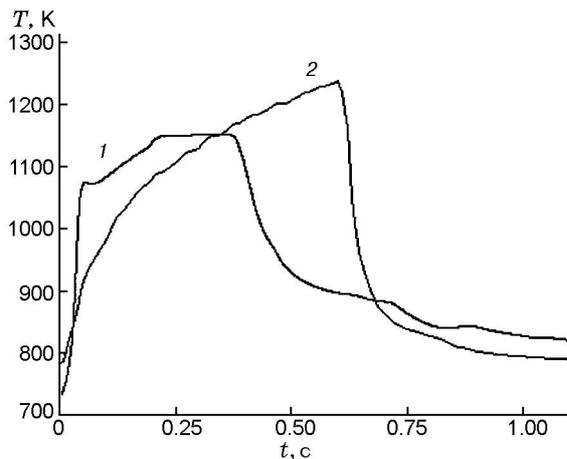


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности образца № 1 ($w = 0$) от времени:

1 — опыт на установке «Уран-1» при $q = 1.42 \cdot 10^6$ Вт/м², $t_e = 0.36$ с (тление), $t_f = 0.06$ с; 2 — опыт с CO_2 -лазером при $q = 1.5 \cdot 10^6$ Вт/м², $t_e = 0.59$ с (тление), $t_f = 0.06$ с

$5 \div 6$ %) — при $t_f = 0.06 \div 0.07$ с. Однако, если в первом случае момент появления пламени ярко выражен на термограмме в виде перегиба, то во втором случае этот перегиб выражен слабо и наблюдается более медленный рост температуры поверхности. Это связано со спецификой устройства CO_2 -лазера и обусловлено неравномерностью распределения энергии в сечении пучка. Несмотря на это, следует отметить тот факт, что времена t_f в обоих случаях одинаковы, а максимальная температура, которую достигает поверхность торфа при воздействии лучистой энергии, различается не более чем на 7 %, при этом во всех экспериментах реализовано устойчивое горение.

На основании этого можно сделать вывод, что использование тепловизора с дисперсионным оптическим фильтром (спектральный интервал $2.5 \div 2.7$ мкм) на установке «Уран-1» вполне корректно и лучистый поток от лампы не вносит существенных изменений в показания прибора. Кроме того, следует иметь в виду, что в процессе интенсивной газификации разогретые продукты пиролиза могут экранировать поверхность образца и влиять на показания тепловизора. Поэтому в качестве температуры поверхности при воспламенении и горении торфа целесообразно рассматривать данные, полученные после прекращения подачи излучения от лампы.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования процесса воспламенения торфа лучистым потоком энергии экспериментально определены:

- 1) энергия воспламенения различных сортов торфа в зависимости от интенсивности излучения ксеноновой лампы;
- 2) характерная температура поверхности воспламенения и горения торфа;
- 3) область лучистых потоков, в которой наблюдается переход от режима пламенного горения торфа к тлеющему.

Установлено, что режим пламенного воспламенения торфа носит вырожденный характер и, как правило, не способствует развитию очага горения. Увеличение влагосодержания торфа приводит к росту плотности энергии воспламенения; ботанический состав торфа, характерного для болот Томской области, и степень его разложения не оказывают практического влияния на характеристики процесса

воспламенения в исследованном диапазоне потоков лучистой энергии. Однако для образцов торфа № 3 из района г. Эдинбург (Великобритания), имеющих несколько большую степень разложения (42 %) и отличающихся ботаническим составом, устойчивое горение под воздействием лучистых потоков в исследуемом диапазоне ($q = 2.1 \cdot 10^5 \div 1.52 \cdot 10^6$ Вт/м²) не реализуется.

Авторы выражают благодарность проф. А. Simeoni (Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, USA) за предоставленные образцы торфа и В. В. Рейно (ИОА СО РАН) за обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М., Якимов А. С. Математическое моделирование возникновения торфяных пожаров // Изв. высших учебных заведений. Физика. — 2009. — Т. 52, № 2/2. — С. 112–121.
2. Гришин А. М., Голованов А. Н., Суков Я. В., Прейс Ю. И. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа // Инж.-физ. журн. — 2006. — Т. 79, № 3. — С. 1–6.
3. Гришин А. М., Голованов А. Н., Медведев В. В. О зажигании слоя лесных горючих материалов световым излучением // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 6. — С. 22–25.
4. Курбатский Н. П. О возникновении лесного пожара в районе падения Тунгусского метеорита // Проблемы метеоретики. — Новосибирск: Наука, 1975. — С. 69–71.
5. Гришин А. М., Ефимов К. Н., Перминов В. А. Зажигание лесных массивов в результате космических и техногенных катастроф // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 2. — С. 18–30.
6. Гришин А. М., Перминов В. А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 5. — С. 107–115.
7. Гришин А. М., Зима В. П., Кузнецов В. Т., Скорик И. А. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 1. — С. 30–35.
8. Пинаев В. С., Щербаков В. А. Пожары, вызванные ядерными взрывами, и их последствия // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 5. — С. 116–121.
9. Большая советская энциклопедия. — М.: Сов. энцикл., 1977. — Т. 26.
10. Лопатина Г. Г., Сасоров В. П., Спицын Б. В., Федосеев Д. В. Оптические печи. — М.: Металлургия, 1969.
11. De Luca L., Caveny L. H., Ohlemiller T. J., Summerfield M. Radiative ignition of double-base propellants: 1. Some formulation effects // AIAA Journal. — 1976. — V. 14, № 7. — P. 940–946.
12. Rosser W. A., Fishman N., Wise H. Ignition of simulated propellants based an ammonium perchlorate // AIAA Journal. — 1966. — V. 4. — P. 1615–1622.
13. Kulkarni A. K., Kumar M., Kuo K. K. Review of solid-propellant ignition studies // AIAA Paper. — 1980. — N 80-1210.
14. Гришин А. М., Голованов А. Н., Суков Я. В., Прейс Ю. И. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа // Инж.-физ. журн. — 2006. — Т. 79, № 3. — С. 1–6.
15. Rein G., Garcia J., Simeoni A., Tihay V., Ferrat L. Smouldering natural fires: comparison of burning dynamics in boreal peat and Mediterranean humus // WIT Trans. on Ecology and the Environment. — 2008. — V. 119. — P. 183–192. — doi: 10.2495/FIVA080191.

*Поступила в редакцию 8/VII 2009 г.,
в окончательном варианте — 10/VI 2010 г.*