

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА ЛУЧИСТЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ

Барановский Н.В.<sup>1</sup>, Гоман П.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: [firedanger@narod.ru](mailto:firedanger@narod.ru)

<sup>2</sup>Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь (220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25), e-mail: [g\\_pn83@mail.ru](mailto:g_pn83@mail.ru)

---

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования процессов зажигания лесных горючих материалов лучистым тепловым потоком. Рассматривается два варианта воздействия лучистого теплового потока – от радиационной панели и от оптической стеклянной линзы. Первый вариант соответствует сценарию воздействия лучистого теплового потока от кромки (фронта) лесного пожара. Как известно, лучистый теплообмен является одним из основных механизмов передачи тепла при распространении лесного пожара. Второй сценарий соответствует воспламенению слоя лесного горючего материала от природного или антропогенного концентратора солнечной энергии. Приведено описание методики экспериментального исследования. Определены времена задержки зажигания для типичного лесного горючего материала (сосновая хвоя). Результаты могут быть применены для разработки физических и математических моделей процессов зажигания лесных горючих материалов и других пожароопасных материалов.

---

Ключевые слова: лесной пожар, зажигание, лесной горючий материал, лучистый тепловой поток, эксперимент, оптическая линза, радиационная панель.

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF FOREST FUEL IGNITION BY A RADIANT THERMAL FLUX

Baranovskiy N.V.<sup>1</sup>, Goman P.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin av., 30), e-mail: [firedanger@narod.ru](mailto:firedanger@narod.ru)

<sup>2</sup>Command-engineering institute of the Ministry of Emergency Measures of Byelorussia, Minsk, Byelorussia (220118, Minsk, Machine engineers street, 25), e-mail: [g\\_pn83@mail.ru](mailto:g_pn83@mail.ru)

---

Results of an experimental research of forest fuel ignition processes by a radiant thermal flux are presented in paper. It is considered two variants of influence of a radiant thermal flux - from the radiating panel and from an optical glass lens. First variant corresponds to the scenario of influence of a radiant thermal flux from an edge (front) of forest fire. As is known, radiant heat exchange is one of the basic mechanisms of heat transfer at forest fire spreading. Second scenario corresponds to ignition of forest fuel layer from the natural or anthropogenous concentrator of a solar energy. Description of experimental research technique is resulted. Ignition delay times for a typical forest fuel (pine needles) are defined. Results can be applied to development of physical and mathematical models of forest fuel and other fire-dangerous materials ignition processes.

---

Keywords: forest fire, ignition, forest combustible material, radiant thermal flux, experiment, optical lens, radiating panel.

### Введение

Современные темпы развития науки и техники в области защиты лесов от пожаров [5] требуют разработки новых систем прогнозирования лесной пожарной опасности на основе математического моделирования физико-химических процессов, протекающих при зажигании лесных горючих материалов (ЛГМ). Важной причиной возникновения лесных пожаров и одним из механизмов передачи тепла при распространении фронта лесного пожара является лучистый тепловой поток. Ранее разработаны теоретические основы

прогностического моделирования зажигания ЛГМ лучистым тепловым потоком [1]. Однако до последнего времени отсутствовали прямые экспериментальные данные по такому механизму зажигания.

Цель исследований – экспериментальное изучение условий зажигания ЛГМ потоком лучистой энергии, в том числе сфокусированным солнечным излучением.

### **Экспериментальное исследование зажигания от радиационной панели**

Проведены экспериментальные исследования по определению особенностей воспламенения типичных ЛГМ сосновых насаждений под воздействием лучистого теплового потока в средневозрастных сосновых насаждениях [4]. После определения веса при естественной влажности образцы были высушены в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния (при температуре 105 °С). Экспериментальные исследования проводились на установке для испытаний на воспламеняемость при плотности теплового потока 15–45 кВт/м<sup>2</sup>, что соответствует температуре нагревательного элемента радиационной панели установки 412–658 °С (рис. 1) [9].



**Рис. 1.** Экспериментальные исследования воспламеняемости ЛГМ

В результате проведенных исследований (табл. 1) установлено, что критическим значением плотности лучистого теплового потока, при котором происходит воспламенение хвои сосны, является 20 кВт/м<sup>2</sup>. Следует отметить, что при воздействии плотности теплового потока менее 20 кВт/м<sup>2</sup> наблюдалось активное выделение газообразных продуктов горения ЛГМ, но воспламенение образцов не наблюдалось.

Проведенные экспериментальные исследования планируется использовать для оптимизации параметров противопожарных разрывов и повышения уровня противопожарной устойчивости лесных массивов Беларуси и России.

Порядок определения пожарно-технических и теплофизических характеристик ЛГМ в лабораторных условиях регламентирован техническими нормативными правовыми актами [10]. Так, например, такие пожарно-технические характеристики, как воспламеняемость ЛГМ, определяются соответственно с использованием установки для испытаний на воспламеняемость [10].

**Таблица 1.** Лабораторные исследования воспламеняемости ЛГМ от радиационной панели

Значение плотности лучистого теплового потока, кВт/м <sup>2</sup>	Время задержки зажигания, с
	хвоя
45	11
	10
	12
40	18
	22
	26
35	27
	33
	30
30	42
	44
	40
25	93
	107
	100
20	201
	195
	207
15	нет
	нет
	нет

### Экспериментальное исследование зажигания от оптической линзы

Известно [8], что используемое в гелиотехнике значение солнечной постоянной  $q=1353 \text{ Вт/м}^2 \pm 1.5\%$ . В последнее время появились публикации, в которых указывается более точное значение  $q=1373 \text{ Вт/м}^2$  [8]. Поскольку расстояние между Землей и Солнцем претерпевает сезонные изменения, интенсивность солнечной радиации, падающей на единичную площадку, также не остается постоянной. Известно, что почти вся энергия, излучаемая Солнцем, приходится на узкий диапазон длин волн в видимой и ближней ИК-области (в диапазоне 0,24-4 мкм заключено 98% энергии излучения) [8]. Часть солнечного излучения рассеивается в атмосфере [3]. В умеренных широтах на поверхность Земли воздействует тепловой поток этого излучения величиной до  $1 \text{ кВт/м}^2$  [11].

В экспериментах использовалась вогнуто-выпуклая стеклянная линза [7] диаметром 11 см с фокусируемым размером пятна в 3-3,5 мм в диаметре. Проведены

экспериментальные измерения теплового потока сфокусированного солнечного излучения, концентрируемого указанной линзой.

В результате цикла вычислений с целью сравнения условий, при которых достигается наилучшее совпадение значений рассчитанных и измеренных  $T_{II}$ , было установлено, что тепловой поток ( $q_{sun}$ ) сфокусированного линзой солнечного излучения, который воздействует на поверхность нагрева эталонного цилиндра, равен  $17780 \pm 1293,5$  Вт/м<sup>2</sup>. Доверительный интервал определения  $q_{sun}$  рассчитан с доверительной вероятностью  $P=0.95$  [2].

Объектом исследования являлись навески лесного горючего материала, сформированные из хвои сосны сбора 2011 года. Эксперименты проведены с хвоей побуревшей, частично разложившейся, предварительно хорошо высушенной. Размеры отдельных хвоинок составляли 7–8 см в продольном и 0.7-1.2 мм в поперечном направлении. Плотность укладки соответствовала плотности укладки в реальном лесном массиве [6]. Возгорание инициировалось солнечным излучением, сфокусированным вогнуто-выпуклой линзой диаметром 11 см (стеклянная, прозрачная). Размер пятна воздействия 3-3,5 мм в диаметре.

*Метеорологические условия в дни проведения экспериментов:*

10.06.12 (время с 12-00 до 13-00) - ясная погода без облаков, температура воздуха 32 °С, скорость ветра  $v=4$  м/с, ветер восточный, давление 745 мм рт. ст.

11.06.12 (время с 12-00 до 14-00) – ясная погода без облаков, температура воздуха 29–32 °С, скорость ветра  $v=5$  м/с, ветер восточный, давление 743 мм рт. ст.

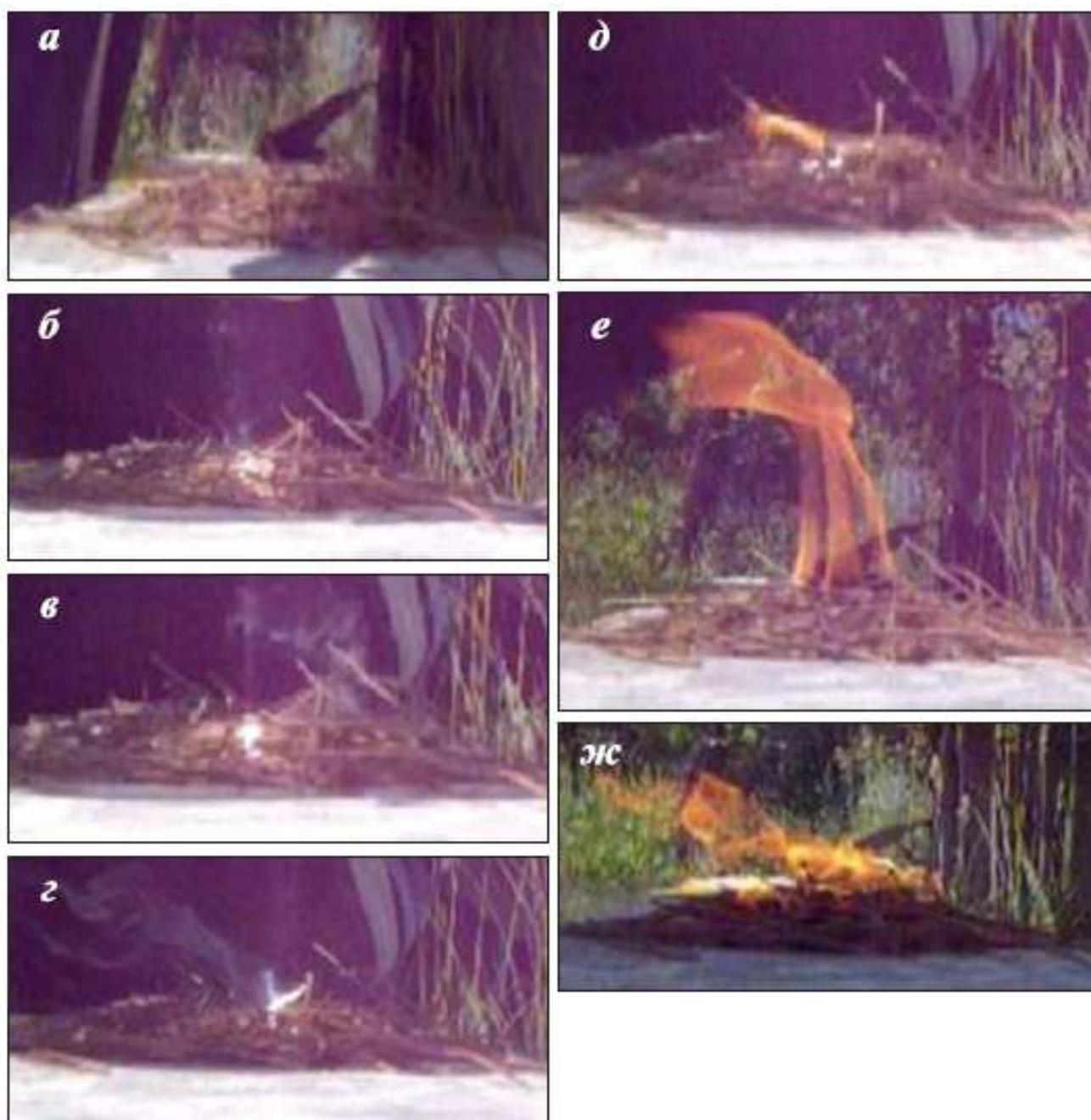
Установлено по результатам видеосъемки процесса, что первой непродолжительной стадией является инертный прогрев слоя ЛГМ. Затем следует этап пиролиза хвои. Необходимым условием зажигания является формирование очага термического разложения на поверхности нагрева не менее 1 см в диаметре. При скорости ветра менее 1 м/с ЛГМ в области воздействия и в небольшой окрестности вокруг пятна сфокусированного солнечного излучения термически разлагается в беспламенном режиме (протекают гетерогенные реакции окисления коксика, газообразные продукты пиролиза диффундируют в область газовой фазы и уносятся конвективными потоками). В случае порыва ветра (и, как следствие, интенсивного вдува окислителя в нагретую до высоких температур область) возможно воспламенение в газовой фазе с образованием микрофакела пламени. С течением времени факел пламени растет и происходит устойчивое распространение пламени по слою ЛГМ. Процесс воспламенения носит случайный характер при малых скоростях ветра и сильно зависит от притока окислителя в результате воздействия ветра на очаг пиролиза ЛГМ (вынужденная конвекция воздушных масс). Характерные кадры процесса зажигания представлены на рис. 2.

В таблице 2 представлены характерные (типичные) результаты экспериментов по возгоранию хвои сосны.

**Таблица 2.** Характерные (типичные) результаты экспериментов по зажиганию хвои сосны

Дата	Время	Т воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Период инертного нагрева, с	Воспламенение	Распространение по слою	Вероятность зажигания	
							для совокупности режимов 1, 2, 3	для режима 3
10.06.12	12-00	32	1	5	Нет	Нет	0,066	1,0
10.06.12	12-25	32	4	5	Да	Да		
10.06.12	12-45	32	2	6	Нет	Нет		
11.06.12	12-00	29	2	6,5	Нет	Нет	0,667	1,0
11.06.12	12-15	29	1	6	Нет	Нет		
11.06.12	12-30	30	0	6	Нет	Нет		
11.06.12	12-40	30	5	5,5	Да	Да		
11.06.12	12-56	31	4	5,5	Да	Да		
11.06.12	13-10	31	0	6	Нет	Нет	0,700	1,0
11.06.12	13-15	31	3,5	5,5	Да	Да		
11.06.12	13-25	32	4	5	Да	Да		
11.06.12	13-35	32	1	6	Нет	Нет		
11.06.12	13-50	32	5	5	Да	Да		

Все результаты экспериментов можно условно разделить на три группы: а) при ветре со скоростью до 3 м/с; б) метеорологические условия, для которых характерно наличие ветра со скоростью от 3 до 4 м/с; в) скорость ветра 4 м/с и более. В первом случае имеет место формирование очага тления, который с течением времени перестает увеличиваться в размере и затухает. Для второго и третьего режимов характерен также рост очага тления с течением времени. Процесс возгорания при скорости ветра более 4 м/с является устойчивым. В диапазоне изменения  $v$  от 3 до 4 м/с воспламенение возможно, но процесс является случайным. Этот режим является переходным. В условиях интенсивной вынужденной конвекции происходит приток окислителя к поверхности пиролиза и переход в режим газофазного зажигания. Для достижения условий воспламенения должен образоваться очаг тления не менее 1 см в диаметре. При меньших размерах очага тления возгораний не установлено.



**Рис. 2.** Характерные кадры видеосъемки процесса зажигания ЛГМ (слой сосновой хвои) сфокусированным солнечным излучением: а)  $t=0$  сек – первоначальный вид слоя; б)  $t=7$  сек – термическое разложение; в)  $t=30$  сек – образование очага тления; г)  $t=40$  сек – рост размеров очага тления; д)  $t=1$  мин 15 сек – зажигание в газовой фазе; е)  $t=1$  мин 23 сек – формирование устойчивого факела пламени; ж)  $t=1$  мин 30 сек – распространение фронта горения по слою.

### Выводы

1. В результате экспериментов установлены условия и определены времена задержки зажигания слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком от радиационной панели.
2. Установлены параметры возгорания ЛГМ в результате действия сфокусированного солнечного излучения.
3. Сравнительный анализ результатов экспериментов показал, что в обоих вариантах воздействия следует использовать газофазную модель зажигания ЛГМ.

### Список литературы

1. Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // Пожаровзрывобезопасность. - 2011. - Т. 20. - № 8. - С. 34–37.
2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М. : Высш. шк., 2003. - 479 С.
3. Кабанов М.В. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. I. Научно-методические основы : монография / под общ. ред. В.Е. Зуева. – Томск : Спектр ИОА СО РАН, 1997. - 211 С.
4. Касперов Г.И., Гоман П.Н. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений // Труды БГТУ. Сер. II. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. - 2010. - Вып. XVIII. - С. 337–340. (Беларусь)
5. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. - 301 с.
6. Курбатский Н.П. Исследование свойств и количества лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии / ИЛиД СО АН СССР. - Красноярск, 1970. - С. 5—58.
7. Ландсберг Г.С. Оптика. - М. : Наука, 1976. - 926 с.
8. Магомедов А.М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. – Махачкала : АОЗТ «Юпитер», 1996. - 245 с.
9. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость: ГОСТ 30402–96. – Введ. 30.04.97. – Минск : Межгос. научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1996. – 31 с.
10. Материалы строительные. Метод испытания на распространение пламени. ГОСТ 30444–97. Введ. 01.10.98. – Минск : Межгос. научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1998. – 12 с.
11. Babrauskas V. Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management, and forensic science. - Fire Science Publishers, Issaquah, 2003. - P. 843.

#### **Рецензенты:**

Немова Т.Н., д.т.н., профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г.Томск.

Пахомов М.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН,  
г.Новосибирск.