

**Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский**

(Национальный исследовательский Томский политехнический университет;  
e-mail: firedanger@narod.ru)

## **ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ СЛОЯ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА СФОКУСИРОВАННЫМ ПОТОКОМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Проведена теоретическая оценка условий зажигания слоя лесного горючего материала (ЛГМ) сфокусированным потоком солнечного излучения. Рассмотрен сценарий катастрофической пожарной опасности, когда влага в слое ЛГМ отсутствует. Материал статьи может быть полезен для решения проблем безопасности техносферы от лесных пожаров.*

*Ключевые слова: зажигание, лесной горючий материал, химическая реакция, стекло, сфокусированное солнечное излучение.*

**G.V. Kuznetsov, N.V. Baranovskiy**

## **CONDITIONS ESTIMATION OF FOREST FUEL LAYER IGNITION BY FOCUSED FLOW OF SUNLIGHT**

*Theoretical estimation of forest fuel layer ignition conditions by focused sunlight is executed. Scenarios of catastrophic fire danger when the moisture in forest fuel layer is absent are carried. The material of article can be useful for solving security problems technosphere from forest fires.*

*Key words: ignition, forest fuel, chemical reaction, glass, focused sunlight.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 29 марта 2011 г.

### **Введение**

Известно [1, 2], что зажигание лесного горючего материала (ЛГМ) лучистым тепловым потоком может быть одной из причин возникновения лесных пожаров. Природным концентратором энергии могут оказаться крупные капли смолы хвойных деревьев, а в качестве антропогенного концентратора следует рассматривать частично или полностью заполненные водой или другой прозрачной жидкостью стеклянные ёмкости либо их осколки [5].

Цель исследования – математическое моделирование зажигания слоя ЛГМ в результате воздействия сфокусированного потока солнечного излучения и определение критических условий процесса воспламенения.

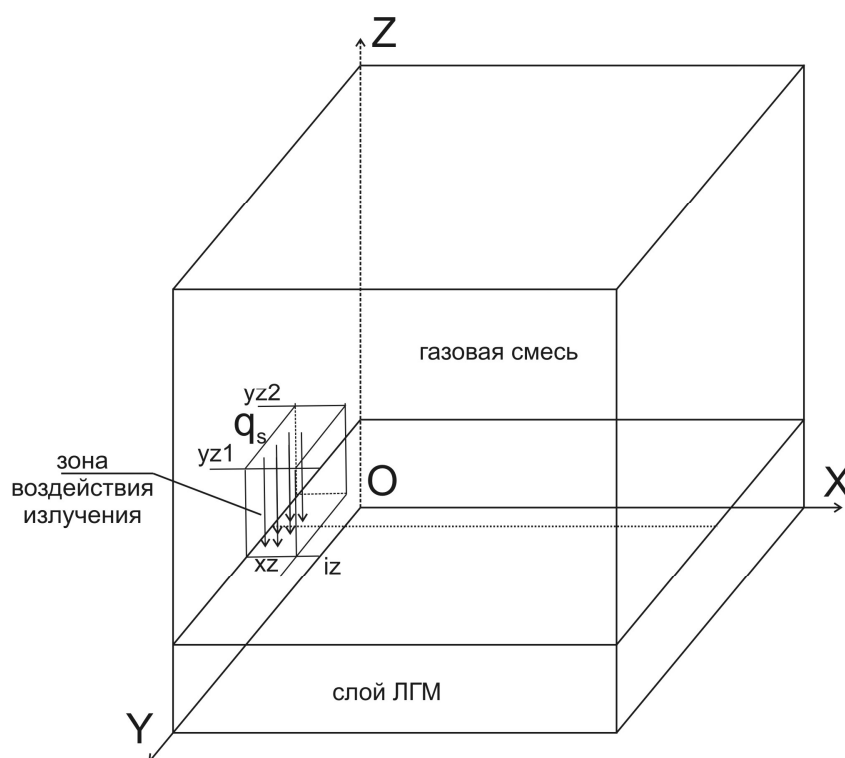
### **Постановка задачи**

В рамках настоящей физической модели не учитывается проникновение солнечного излучения в слой ЛГМ. Предполагается, что поступление тепла в слой ЛГМ осуществляется только на границе раздела сред "слой ЛГМ" и "газовая смесь".

Принята следующая схема процесса. На подстилающей поверхности расположен слой ЛГМ, на малом участке которого фокусируется поток солнечного излучения. Процессы, происходящие в фокусирующем элементе, не моделиру-

ются, так как в настоящее время нет ни теоретических, ни экспериментальных результатов исследования прохождения солнечного излучения через стеклянные объекты и смолистые образования в реальной геометрии. Слой ЛГМ нагревается и термически разлагается с образованием газообразных продуктов пиролиза. Состав газовой смеси принимается трехкомпонентным (горючее – монооксид углерода, окислитель – кислород, инертные компоненты). Продукты пиролиза диффундируют в область газовой смеси. При определенных температуре и концентрациях реагирующих газов происходит зажигание смеси. Приняты следующие критерии зажигания: 1) теплоприход от химической реакции превышает тепловой поток от нагретой поверхности в область газовой смеси; 2) температура в газовой смеси достигает критического значения. Символами  $\Gamma$  обозначены границы области решения и различных слоев.

Конвективный перенос тепла и вещества не учитывается, так как в период зажигания тепловая и диффузионная длины релаксации на несколько порядков больше конвективной [6]. На рис. 1 представлена геометрия области решения.



**Рис. 1.** Область решения

Воспламенение слоя ЛГМ сфокусированным потоком солнечного излучения описывается системой трехмерных нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии (1), (2), (6), (9) с соответствующими начальными и граничными условиями. Численная реализация проведена с использованием локально-одномерного конечно-разностного метода [7]. Разностные аналоги одномерных уравнений теплопроводности и диффузии решены методом прогонки в сочетании с методом простой итерации [8].

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) - q_p k_1 \rho_3 \varphi \exp \left( -\frac{E_1}{RT_1} \right). \quad (1)$$

Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) + q_5 (1 - \nu_5) R_5. \quad (2)$$

Граничные условия для уравнений (1), (2):

$$\Gamma_0 \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (3.1)$$

$$\Gamma_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} + q_s, \quad T_1 = T_2, \quad (3.2.1)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad T_1 = T_2, \quad (3.2.2)$$

$$\Gamma_2 \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad (3.3)$$

$$\Gamma_{3.1} \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad (3.4)$$

$$\Gamma_{3.2} \quad T_1 = T_{1s}, \quad (3.5)$$

$$\Gamma_{3.3} \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0, \quad (3.6)$$

$$\Gamma_{3.4} \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad (3.7)$$

$$\Gamma_{4.1} \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad (3.8)$$

$$\Gamma_{4.2} \quad \alpha_2 (T - T_{ea}) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \quad (3.9)$$

$$\Gamma_{4.3} \quad \alpha_2 (T_{es} - T) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad (3.10)$$

$$\Gamma_{4.4} \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}. \quad (3.11)$$

Начальные условия для уравнений (1), (2):

$$T_i|_{t=0} = T_{i0}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -k_1 \rho_1 \varphi \exp \left( -\frac{E_1}{RT_1} \right), \quad \varphi|_{t=0} = \varphi_0. \quad (5)$$

Уравнение диффузии для окислителя:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial z^2} \right) - \frac{M_4}{M_5} R_5. \quad (6)$$

Граничные условия для уравнения (6):

$$\Gamma_1 \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0, \quad (7.1)$$

$$\Gamma_2 \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0, \quad (7.2)$$

$$\Gamma_{3.3} \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial x} = 0, \quad (7.3)$$

$$\Gamma_{3.4} \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial x} = 0, \quad (7.4)$$

$$\Gamma_{4.2} \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial y} = 0, \quad (7.5)$$

$$\Gamma_{4.4} \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial y} = 0. \quad (7.6)$$

Начальные условия для уравнения (6):

$$C_4|_{t=0} = C_{4.0}. \quad (8)$$

Уравнение диффузии для горючих компонент пиролиза:

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_5}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_5}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_5}{\partial z^2} \right) - R_5. \quad (9)$$

Граничные условия для уравнения (9):

$$\Gamma_1 \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = Y_5, \quad (10.1.1)$$

$$\Gamma_1 \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = 0, \quad (10.1.2)$$

$$\Gamma_2 \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = 0, \quad (10.2)$$

$$\Gamma_{3.3} \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial x} = 0, \quad (10.3)$$

$$\Gamma_{3.4} \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial x} = 0, \quad (10.4)$$

$$\Gamma_{4.2} \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial y} = 0, \quad (10.5)$$

$$\Gamma_{4.4} \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial y} = 0. \quad (10.6)$$

Начальные условия для уравнения (9):

$$C_5|_{t=0} = C_{5.0}. \quad (11)$$

Уравнение баланса массы:

$$\sum_{i=4}^6 C_i = 1. \quad (12)$$

Начальные условия для уравнения (12):

$$C_6|_{t=0} = C_{6,0}. \quad (13)$$

Выражение для массовой скорости реакции  $R_5$  [9]:

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT_1}\right) \cdot \begin{cases} x_1^{0,25} x_2, & x_1 > 0,05 \\ x_1 x_2, & x_1 \leq 0,05 \end{cases}, \quad (14)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^6 \frac{C_k}{M_k} M_i}. \quad (15)$$

В формулах (1)-(15) приняты следующие обозначения:

$T_i, \rho_i, c_i, \lambda_i$  – температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность (1 – слоя ЛГМ, 2 – воздуха);

$C_i, M_i$  – концентрация и молярная масса (4 – окислителя, 5 – горючего газа, 6 – инертных компонентов воздуха);

$q_p$  – тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ;

$k_1$  – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ;

$E_1$  – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$\varphi$  – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ;

$q_5$  – тепловой эффект реакции окисления оксида углерода;

$v_5$  – доля теплоты поглощенная слоем ЛГМ;

$R_5$  – массовая скорость реакции окисления оксида углерода;

$\alpha_1$  – коэффициент теплопередачи;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи;

$k_5$  – предэкспонент реакции окисления оксида углерода;

$E_5$  – энергия активации реакции окисления оксида углерода;

$D$  – коэффициент диффузии;

$Y_5$  – поток массы горючих продуктов пиролиза;

$x_i$  – вспомогательная переменная;

$q_s$  – поток сфокусированного солнечного излучения;

$x, y, z$  – пространственные координаты;

$t$  – временная координата.

Индексы  $es, ea, 0$  – соответствуют параметрам окружающей среды в почве, воздухе и в начальный момент времени.

При численном моделировании использованы следующие исходные данные:  $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_2 = 0,1 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_1 = 1400 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $c_2 = 1200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda_1 = 0,102 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda_2 = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ;  $q_p = 1000 \text{ Дж/кг}$ ;  $k_1 = 3,63 \cdot 10^4$ ;  $E_1/R = 9400 \text{ K}$ ;  $\varphi_{1н} = 1$ ;  $q_5 = 10^7 \text{ Дж/кг}$ ;  $k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ;  $E_5/R = 11500 \text{ K}$ ;  $v_5 = 0,3$ ;  $\alpha_1 = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ ;  $\alpha_2 = 80 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ ;  $D = 10^{-6}$ ;  $M_4 = 0,032$ ;  $M_5 = 0,028$ ;  $M_6 = 0,044$ .

## Результаты и обсуждение

В результате вычислительных экспериментов получена зависимость времен задержки воспламенения от величины теплового потока сфокусированного солнечного излучения. Следует отметить, что наличие влаги в слое ЛГМ игнорируется и влажность принимается равной нулю. Заметим, что это допущение соответствует катастрофическим сценариям пожарной опасности в лесу. В связи с наблюдаемыми и прогнозируемыми климатическими изменениями актуальность таких исследований будет возрастать год от года [10]. Например, катастрофические пожарные условия сложились в 2009 году в Австралии (штат Виктория) и в 2010 году в Центральной России.

В табл. 1 приведены времена задержки воспламенения в зависимости от величины теплового потока сфокусированного солнечного излучения. Также приведены известные экспериментальные данные по зажиганию слоя ЛГМ излучением [11].

Таблица 1

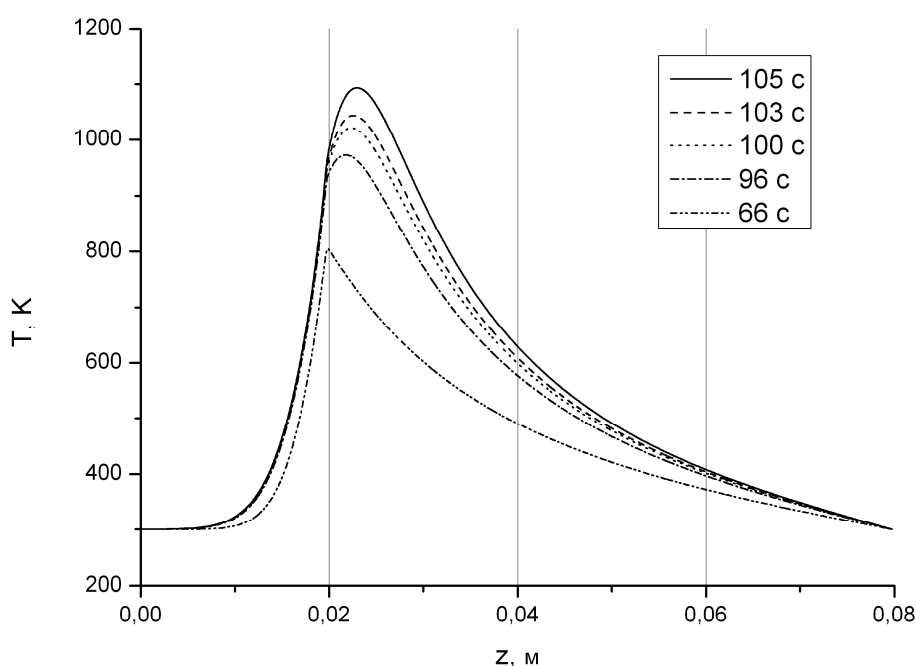
**Времена задержки воспламенения слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком**

Тепловой поток $q_s$ , $кВт/м^2$	Время задержки воспламенения (расчет 2D) $t_{ign}, c$	Время задержки воспламенения (расчет 3D) $t_{ign}, c$	Время задержки воспламенения (эксперимент [11]) $t_{ign}, c$
15	99	105	Нет зажигания
20	62	63	197-207
25	33	34	93-100
30	26	26	40-42
35	21	21	27-30
40	18	18	18-26

Сценарное моделирование позволило установить нижний порог теплового потока сфокусированного солнечного излучения, при котором происходит воспламенение слоя ЛГМ. Моделирование осуществлялось в полной трехмерной постановке. Тепловой поток плотностью  $15 кВт/м^2$  является минимальной величиной, при котором еще возможно воспламенение слоя ЛГМ. Таким образом, относительно небольшое 10-кратное превышение интенсивности потока естественного солнечного излучения может привести к возникновению очага низового лесного пожара. Среднее отклонение результатов численного моделирования от экспериментальных данных составило около 38 %. Распределение температуры по вертикали в центре зоны воздействия теплового потока сфокусированного солнечного излучения представлено на рис. 2 в различные моменты времени. Из результатов видно, что первоначально слой ЛГМ и газовая смесь прогреваются инертно. Эта стадия длится до достижения температурного порога около  $900 °К$ . С течением времени в некоторой окрестности поверхности слоя ЛГМ происходит ускорение химической реакции и рост тепловыделения, формируется характерный для области воспламенения пик на температурной кривой (рис. 2).

В результате редукции математической модели по одной из горизонтальных координат была получена более простая двумерная математическая модель зажигания слоя ЛГМ сфокусированным потоком солнечного излучения.

При величинах потока сфокусированного солнечного излучения, равных или превышающих  $30 \text{ кВт/м}^2$ , отличия времен задержки воспламенения по трехмерной и двумерной постановкам составляет сотые доли секунды. Наибольшее расхождение результатов, полученных по двумерной и трехмерной постановкам, заметно при нижнем пороге лучистого теплового потока, при котором еще происходит воспламенение слоя ЛГМ. Также максимальные отличия между теоретическими оценками и экспериментальными данными [11] фиксируются в области низких тепловых потоков. Вероятно, при таких значениях  $q_s$  заметную роль играют какие-то не описываемые в системе уравнений (1)-(15) второстепенные факторы.



**Рис. 2.** Распределение температуры в системе "слой ЛГМ – газовая смесь" до и в момент зажигания при  $q_s = 15000 \text{ Вт/м}^2$

Основные закономерности тепло- и массопереноса, установленные в случае двумерной постановки, сохраняются и для пространственного моделирования. Дополнительный отвод тепла по третьей координате и диффузия в этом же направлении приводят к увеличению времени задержки воспламенения. Критерии зажигания выполняются для тех же условий, но наступают они чуть позже.

Представляет интерес исследование условий воспламенения слоя ЛГМ при малых периферических размерах зоны воздействия сфокусированного солнечного излучения. В табл. 2 представлены времена задержки воспламенения в зависимости от теплового потока излучения и периферического размера зоны воздействия.

**Времена задержки воспламенения в зависимости  
от периферического размера зоны воздействия излучения**

Периферический размер $d$ , мм	Время задержки воспламенения, $t_{ign}$ , с				
	40 кВт/м <sup>2</sup>	35 кВт/м <sup>2</sup>	30 кВт/м <sup>2</sup>	25 кВт/м <sup>2</sup>	20 кВт/м <sup>2</sup>
10	26	35	48	69	108
8	35	49	70	104	159
6	59	84	126	нет	нет
4	154	нет	нет	нет	нет
2	нет	нет	нет	нет	нет

В результате вычислений было установлено, что при периферических размерах зоны воздействия, равных и менее 10 мм, величина  $t_{ign}$  увеличивается с уменьшением  $d$ . Такие зоны воздействия можно считать точечными. Во-первых, увеличивается время задержки воспламенения по сравнению с площадными зонами воздействия. Во-вторых, при прочих равных условиях для зоны воздействия с периферическим размером 2 мм и менее установлено, что воспламенения не происходит. Минимальное отклонение от площадных зон воздействия наблюдается для периферического размера 10 мм и теплового потока величиной 40 кВт/м<sup>2</sup>. Это объясняется, скорее всего, более поздним достижением условий воспламенения. Требуется больше времени, чтобы концентрация горючего достигла необходимого значения. Кроме того, при таких точечных зонах воздействия значительную роль начинает играть отток тепла из этой области в результате теплопроводности. Вычисления показали, что при тепловых потоках менее 20 кВт/м<sup>2</sup> не происходит воспламенения слоя ЛГМ.

Следует заметить, что результаты проведенных вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод о важности периферических размеров зоны воздействия теплового потока излучения. В работе [11] не представлены такие данные. Указано только, что в состав испытательной установки входит радиационная панель с нагревательным элементом. Возможно, различия в экспериментальных данных и теоретических результатах также объясняются тем фактом, что в эксперименте [11] не контролировался такой параметр, как периферический размер зоны воздействия лучистого теплового потока. Целесообразно поставить эксперимент, в котором бы учитывалась зависимость времени задержки воспламенения от периферических размеров зоны воздействия. Особенно это актуально для зон воздействия с малым периферическим размером.



## Заключение

В результате вычислительных экспериментов установлено, что среднее отклонение во времена задержки воспламенения при использовании двумерной и трехмерной постановок составляет до 2 %. Это полностью обосновывает возможность использования в практике мониторинга и оценки лесной пожарной опасности одномерной и двумерной постановок.

Показано, что при периферических размерах зоны воздействия сфокусированного солнечного излучения, равных и менее 10 мм, величина  $t_{ign}$  зависит от размеров зоны нагрева ЛГМ. С уменьшением  $d$  увеличивается время задержки воспламенения. Для малых периферических размеров зоны воздействия излучения воспламенения вообще не происходит.

## Литература

1. **Гришин А.М., Ефимов К.Н., Перминов В.А.** Математическое моделирование зажигания лесных горючих материалов в результате столкновительных и техногенных катастроф в квазиодномерном приближении // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 2. С. 18-30.
2. **Курбатский И.П.** О возникновении лесного пожара в районе падения Тунгусского метеорита // Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975. С. 68-71.
3. **Перминов В.А.** Математическое моделирование распространения плоского фронта верхового лесного пожара // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. С. 108-115.
4. **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.
5. **Об утверждении** Правил пожарной безопасности в лесах: постановление Правительства РФ от 30 июня 2007 г. № 417 // Пожарная безопасность. 2007. № 4.
6. **Вилунов В.Н.** Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. 187 с.
7. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Аддитивные схемы для задач математической физики. М.: Наука, 2001. 320 с.
8. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. С. 33-36.
9. **Гришин А.М., Шипулина О.В.** Математическое моделирование распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах и вдоль просек // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 6. С. 17-29.
10. **Flannigan M.D., Stocks B.J., Wotton B.M.** Climate change and forest fires // Science of the Total Environment. 2000. Vol. 262. N 3. P. 221-229.
11. **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.