

*ПУЗАЧ Сергей Викторович*

Доктор технических наук, профессор  
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия  
E-mail: puzachsv@mail.ru

*ЛЕ Ань Туан*

Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия  
E-mail: leanhtuant34@gmail.com

*НГУЕН Тхань Хай*

Кандидат технических наук  
Институт Пожарной Безопасности Вьетнама, Ханой, Вьетнам  
E-mail: nguyenthanhhait34@gmail.com

## ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ПЯТНИСТОГО ВОЗГОРАНИЯ ПРИ ВЕРХОВОМ ЛЕСНОМ ПОЖАРЕ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Рассматривается пожарная опасность пятнистого возгорания, возникающего при лесном верховом пожаре вблизи объекта энергетики. Выполнен анализ нормативных требований к безопасным расстояниям от объектов энергетики до кромки лесного массива. Предложена математическая модель расчёта параметров теплообмена. С использованием разработанной модели проведены численные эксперименты по расчёту полей температур и лучистых тепловых потоков при пятнистом возгорании.

*Ключевые слова:* лесной верховой пожар, пятнистое возгорание, объект энергетики, лучистый тепловой поток, безопасное расстояние.

Лесные пожары могут вызвать катастрофические разрушения жизненно важных для экономики и безопасности страны объектов энергетики, прекращение функционирования которых ведёт к нарушению жизнедеятельности человека. Однако в современных нормативных документах за исключением постановления Правительства РФ от 26 августа 2013 года № 736, устанавливающего требования к границам охранных зон объектов электросетевого хозяйства, не приведены числовые значения или методики расчёта безопасного противопожарного расстояния от объектов энергетики до кромки лесного массива.

Сложность разработки метода расчёта теплового воздействия лесных пожаров на объекты энергетики (ГЭС, ТЭС, электроподстанции, линии электропередач и т. п.) заключается в многофакторности и нелинейности задачи, а также в неопределённости исходных данных по теплофизическим и химическим свойствам лесных горючих материалов. Математическое моделирование лесного пожара представляет собой крайне сложную, в полном виде не решённую проблему [1–7].

Среди верховых лесных пожаров выделяется категория пожаров, определяющим механизмом распространения которых является разлёт горящих и тлеющих частиц лесных горючих материалов и которые называются пятнистыми возгораниями [1]. Горящие частицы в большом количестве падают перед фронтом верхового пожара, распространяющегося при сильном ветре, образуя новые очаги горения. При наличии мощной конвективной колонки над кромкой верхового пожара горящие частицы могут подниматься ею на значительную высоту и переноситься ветром на расстояния, достигающие нескольких сотен метров [1]. Такая конвективная колонка сама может стать источником пятнистых загораний, а лесной пожар может принять пульсирующий характер, распространяясь скачками [1].

Экспериментальных данных по параметрам такого типа пожара, которые могут быть использованы при разработке математической модели расчёта воздействия пятнистого возгорания на объекты энергетики, в литературных источниках за исключением работы [1] практически нет, так как измерения и наблюдения в условиях таких пожаров сопряжены с большой опасностью.

В настоящей статье проведён анализ условий возникновения пожарной опасности пятнистого возгорания (в дополнение к переносу горящих и тлеющих частиц лесных горючих материалов) для объектов энергетики за счёт повышенных лучистых тепловых потоков.

### НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНЫМ РАССТОЯНИЯМ ОТ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ДО КРОМКИ ЛЕСНОГО МАССИВА

В современных нормативных документах (исключение – постановление Правительства РФ от 26 августа 2013 г. № 736) не приведены величины или методики расчёта безопасного противопожарного расстояния от объектов энергетики до кромки лесного массива, но в соответствии с данным постановлением устанавливаются следующие охранные зоны к границам объектов электросетевого хозяйства:

– вокруг подстанций – в виде части поверхности участка земли и воздушного пространства (на высоту, соответствующую высоте наивысшей точки подстанции), ограниченной вертикальными плоскостями, отстоящими от всех сторон ограждения подстанции по периметру на расстоянии 20 м для подстанций 110 кВ;

– вдоль воздушных линий электропередачи – в виде части поверхности участка земли и воздушного пространства (на высоту, соответствующую высоте опор воздушных линий электропередачи), ограниченной параллельными вертикальными плоскостями, отстоящими по обе стороны линии электропередачи от крайних проводов при неотклоненном их положении на расстоянии 20 м в случае номинального класса напряжения 110 кВ.

Научное обоснование выбора безопасного расстояния от объектов энергетики до кромки лесного массива в литературных источниках за исключением работы [8] отсутствует.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ТЕПЛОМАССОБМЕНА

Обобщённое трёхмерное нестационарное дифференциальное уравнение законов сохранения массы, импульса и энергии представлено в статье [9]. Замкнутая система уравнений, представленная в работе [9], решена численно методом контрольных объёмов [10] с использованием компьютерной программы «Интегральные, зонные и полевые методы расчёта динамики опасных факторов пожара», которая реализует полевую модель расчёта термогазодинамики пожара [11].

Основой для простой математической модели расчёта теплового излучения от пятнистого возгорания является уравнение лучистого теплообмена [12]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{и}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \psi, \quad (1)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, падающего на облучаемую поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{\text{и}}$  – эффективная температура излучающей поверхности пятнистого возгорания, К;  $T_0$  – температура на облучаемой поверхности, К;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведённая степень черноты системы «излучаемая поверхность – облучаемая поверхность»;  $c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;  $\psi$  – коэффициент облучённости между излучающей и облучаемой поверхностями, в который входит расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облучённости элементарной площадки облучаемого тела вычисляется по формуле [12]

$$\psi = \int_{F_{\text{и}}} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_{\text{и}}, \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние между элементарными площадками излучаемой и облучаемой поверхностей, м;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между нормальными к элементарным площадкам излучаемой и облучаемой поверхностей и прямой линией с длиной  $r$ , соединяющей центры этих площадок, рад;  $F_{\text{и}}$  – площадь излучаемой поверхности, м<sup>2</sup>.

Основная проблема при использовании формул (2) и (3) состоит в неопределённости формы излучающей поверхности пятнистого пожара и нахождения эффективной температуры  $T_{\text{и}}$ .

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Размеры поверхности горючего материала (древесная стружка) при проведении экспериментов в работе [1] составляли 70×70 м.

Размер конечно-разностной сетки для решения системы уравнений (подробно рассмотрено в статье [9]) с использованием компьютерной программы соответствовал количеству ячеек 101×101×51 вдоль соответствующих координатных осей. Шаг по пространственным координатам был переменным с минимальной величиной в области горючего материала (0,5 м).

Пожарная нагрузка равнялась 1 кг/м<sup>2</sup> [1], удельная массовая скорость выгорания –  $\psi = 0,01$  кг/(с·м<sup>2</sup>) [13].

Однако пожарная нагрузка поверхностного слоя лесного массива может достигать 5 кг/м<sup>2</sup> и более [13, 14], например, на *рисунке 1* приведены типичные лесные пожары во Вьетнаме.



а



б

Рисунок 1. Лесные пожары во Вьетнаме: а – низовой пожар в деревне Лап-Динь, провинция Винь-Фук (15.02.2016 г.); б – верховой пожар на перевале Мимоза, город Да-Лат (18.02.2013 г.)

Очаг горения охватывает всю толщину надземного слоя горючих материалов (см. *рис. 1, а*), поэтому массовая скорость выгорания  $\psi$ , относящаяся к единице площади надземного слоя, может существенно превышать соответствующую скорость для поверхности древесины. Для вариантных численных расчётов данный показатель принимается равным 0,05 и 0,1 кг/(с·м<sup>2</sup>).

Низшая рабочая теплота сгорания для всех видов древесных лесоматериалов изменяется в пределах 16,8–21,2 МДж/кг [13, 15], следовательно, неопределённость в выборе вышеуказанной теплоты приведёт к погрешности порядка 10 % при задании средней её величины 19,0 МДж/кг.

В своих исследованиях авторы настоящей статьи рассматривали лучистый теплоперенос от пятнистого пожара, который может привести к воспламенению горючих материалов, находящихся на объекте энергетики, или к термическим ожогам и другим тяжёлым последствиям для персонала объекта.

В соответствии с методикой определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах (приложение к приказу МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404) и работой [12] критическая величина плотности лучистого теплового потока была принята равной  $q_{кр1} = 1400$  Вт/м<sup>2</sup> для человека и  $q_{кр2} = 12900$  Вт/м<sup>2</sup> в случае воспламенения древесины.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**В** таблице приведены результаты сравнения расчётных значений температур и скоростей на различных высотах  $z$  от поверхности земли внутри конвективной колонки с экспериментальными данными и результатами расчётов, представленными в работе [1], а также при повышенной скорости выгорания.

Величины температур и скоростей на различных высотах внутри конвективной колонки

Высота от поверхности земли, м	Превышение температуры газовой смеси над температурой окружающей среды, °С				Вертикальная составляющая скорости газового потока, м/с			
	Эксперимент [1]	Расчёт [1]	Расчёт по уравнениям [9] при $\psi = 0,01$ кг/(с·м <sup>2</sup> )	Расчёт по уравнениям [9] при $\psi = 0,05$ кг/(с·м <sup>2</sup> )	Эксперимент [1]	Расчёт [1]	Расчёт по уравнениям [9] при $\psi = 0,01$ кг/(с·м <sup>2</sup> )	Расчёт по уравнениям [9] при $\psi = 0,05$ кг/(с·м <sup>2</sup> )
1,5	251	282	271	458	–	4,3	4,1	4,0
5,0	84	91	89	156	1,9	3,9	3,2	4,6
10,0	45	40	47	83	2,6	3,5	3,4	4,6
20,0	17	24	23	53	2,9	4,1	3,8	5,8

Математическая модель в работе [1] имеет ряд существенных допущений по физической картине развития пожара внутри конвективной колонки, образующейся над пятнистым возгоранием: процесс является стационарным, параметры в поперечном сечении колонки постоянны и изменяются только вдоль вертикальной оси колонки. Удовлетворительное совпадение расчёта по методике [1] с экспериментом (см. *табл.*) объясняется подбором большого количества эмпирических констант для определения изменения объёма колонки по высоте.

Из анализа данных таблицы видно, что отличие в превышении температуры газовой смеси над температурой окружающей среды, полученное с использованием системы уравнений, рассмотренной в статье [9] и из эксперимента, меньше 26 % на высоте от уровня земли  $z = 20$  м и менее 5,6 % при  $z < 10$  м.

Таким образом, точность предложенного в данной работе метода достаточна для инженерных расчётов, учитывая чрезвычайную сложность физического процесса.

На *рисунке 2* представлены поля температур в продольном разрезе конвективной колонки, об-

разующейся над горючим материалом, при условиях проведения эксперимента [1] и при повышенной массовой скорости выгорания.

На *рисунке 3* представлены распределения температуры по высоте конвективной колонки в геометрическом центре прямоугольника горючего материала при различных удельных массовых скоростях выгорания горючего материала.

Поля плотностей лучистых тепловых потоков в продольном разрезе конвективной колонки, образующейся над горючим материалом, при повышенной массовой скорости выгорания приведены на *рисунке 4*.

На *рисунке 5* представлена зависимость плотностей лучистых потоков от расстояния ( $x$ , м) от центра стороны прямоугольника горючего материала при повышенной массовой скорости выгорания на высоте 2 м от уровня земли.

При использовании формул (1) и (2) форма и площадь излучающей поверхности принималась по результатам численных экспериментов. В случае  $\psi = 0,05$  кг/(с·м<sup>2</sup>):  $T_{и} = 502$  °С,  $F_{и} = 70 \times 5$  м; при  $\psi = 0,1$  кг/(с·м<sup>2</sup>):  $T_{и} = 605$  °С,  $F_{и} = 70 \times 15$  м.

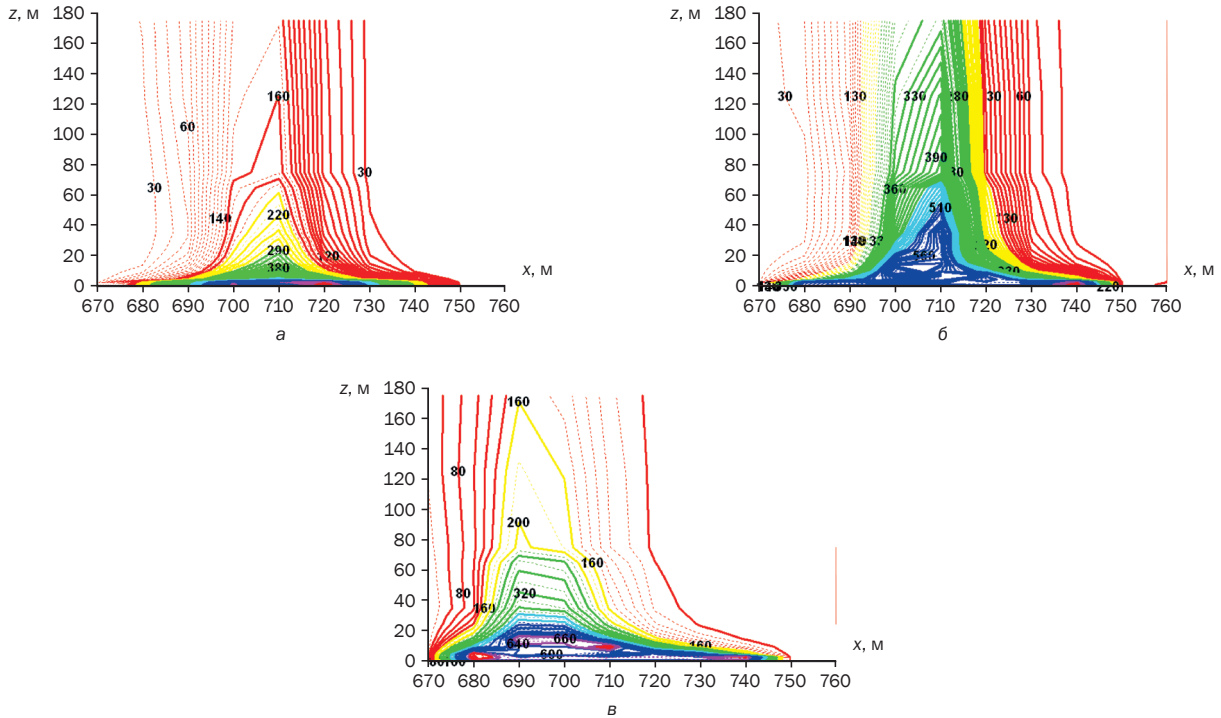


Рисунок 2. Поля температур в продольном разрезе конвективной колонки:  
 а -  $\psi = 0,01 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  [1]; б -  $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ; в -  $\psi = 0,1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$

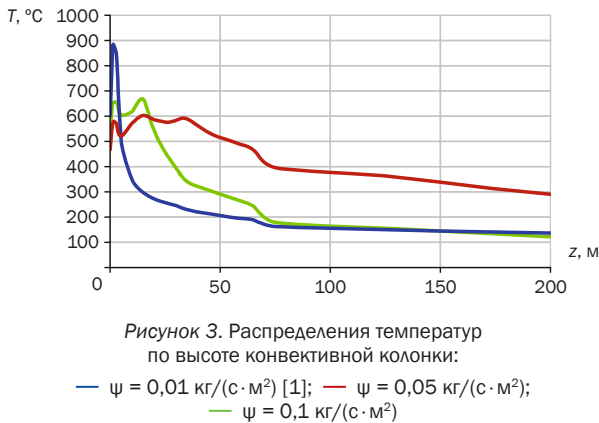


Рисунок 3. Распределения температур по высоте конвективной колонки:

—  $\psi = 0,01 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  [1]; —  $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  
 —  $\psi = 0,1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$

Критическая для человека величина плотности лучистого теплового потока  $q_{кр1} = 1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$  достигается на расстояниях от центра стороны прямоугольника горючего материала, равных  $x_{кр} = 49 \text{ м}$  при  $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и  $x_{кр} = 105 \text{ м}$  в случае  $\psi = 0,1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  (рис. 4 и 5).

Воспламенение древесины при  $q_{кр2} = 12900 \text{ Вт}/\text{м}^2$  происходит на расстояниях от центра стороны прямоугольника горючего материала, равных  $x_{кр} = 14 \text{ м}$  при  $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и  $x_{кр} = 9 \text{ м}$  в случае  $\psi = 0,1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ .

Пожарная опасность пятнистого возгорания в добавление к переносу горящих и тлеющих частиц

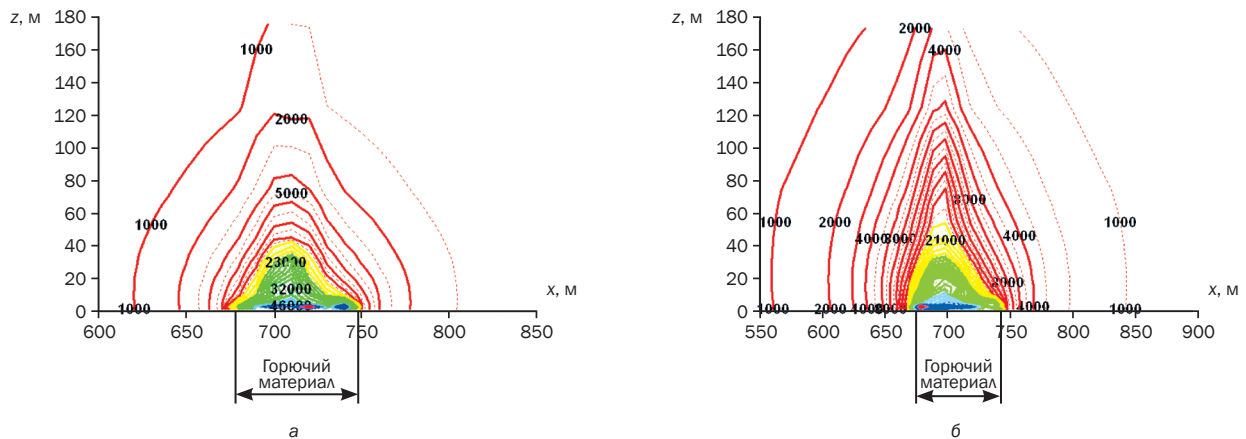


Рисунок 4. Поля плотностей лучистых тепловых потоков в продольном разрезе конвективной колонки:  
 а -  $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ; б -  $\psi = 0,1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$



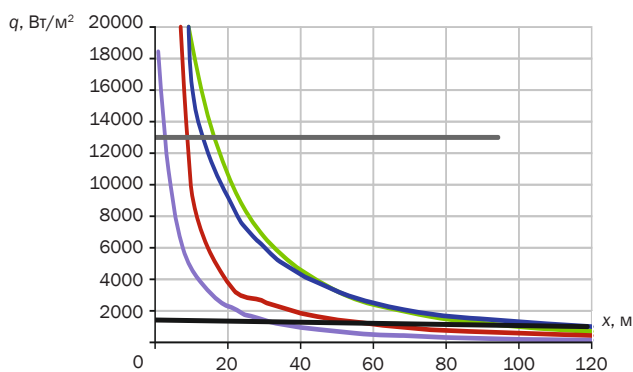


Рисунок 5. Зависимость плотностей лучистых потоков от расстояния от центра стороны прямоугольника горячего материала (высота 2 м от уровня земли):

полевая модель (уравнение (1) в работе [9]): —  $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  
—  $\psi = 0,1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  
выражение (в настоящей работе): —  $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  
—  $\psi = 0,1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ; —  $q_{кр1}$ ; —  $q_{кр2}$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В. Г., Коленов Е. В. Оценка параметров конвективной колонки, возникающей при пятнистых загораниях от верхнего пожара // Сборник научных трудов «Лесные пожары и борьба с ними». Л.: ЛенНИИЛХ, 1986. С. 54–66.
2. Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров. Монография. Новосибирск: СО РАН, 2008. 403 с.
3. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2008. № 2 (3). С. 105–114.
4. Martin J., Hillen T. The Spotting Distribution of Wildfires. Applied Science. 2016. Vol. 6, no. 6. P. 177. DOI: 10.3390/app6060177
5. Kaur I., Mentrelli A., Bosseur F., Filippi J. B., Pagnini G. Turbulence and fire-spotting effects into wild-land fire simulators. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations, 2016. No. 39. P. 300–320.
6. Sardoy N., Consalvi J.-L., Porterie B., Fernandez-Pello A. C. Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees. Combustion and Flame. 2007. No. 150. P. 151–169.
7. Cunningham P., Goodrick S. L., Hussaini M. Y., Linn, R. R. Coherent vertical structures in numerical simulations of buoyant plumes from wildland fires. International Journal of Wildland Fire. 2005. No. 14. P. 61–75.
8. Пузач С. В., Горюшкин С. С. Оценка теплового воздействия лесного пожара на электрическую подстанцию с масляными трансформаторами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 3. С. 79–83. DOI: 10.25257/FE.2017.3.79-83
9. Пузач С. В., Лебедченко О. С., Пузач В. Г., Меляшинский М. Д. Особенности образования пожаро- и взрывоопасных зон при натекании газообразного водорода в нижнюю часть условно герметичного помещения // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 2. С. 58–63. DOI: 10.25257/FE.2018.2.58-63
10. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ. под ред. В. Д. Виленского. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
11. Пузач С. В. Методы расчёта теплообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
12. Кошмаров Ю. А. Теплотехника. Учебник. М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. 501 с.
13. Иванов А. В. Лесная пирология. Конспект лекций. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. 276 с.
14. Хуинь Л. Д. Лесоводственно-экологическая оценка последствий лесных пожаров в лесах из мелалеуки белодревесной (Melaleuca cajuputi Powell) на юге Вьетнама: дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02 / Хуинь Ле Дык. СПб., 2013. 136 с.
15. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Учебное пособие. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.

лесных горючих материалов [1] для объектов энергетики заключается в повышенных лучистых тепловых потоках, возникающих при удельной (по площади пожара) массовой скорости выгорания, существенно превышающей соответствующее значение для поверхности древесины.

При рассмотренном модельном пятнистом возгорании безопасная зона от кромки пожара до места нахождения персонала объекта (без учёта коэффициента запаса по точности расчётов) превысила 100 м, что значительно превышает требуемую (20 м) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 26 августа 2013 года № 736.

Необходимо проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований для разработки нормативных документов по определению безопасных расстояний от объектов энергетики до кромки лесного массива.

Материал поступил в редакцию 9 апреля 2018 года.

**Sergei PUZACH**

Grand Doctor of Philosophy in Engineering Sciences, Professor  
State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia  
E-mail: puzachsv@mail.ru

**LE Anh Tuan**

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia  
E-mail: leanhtuan34@gmail.com

**NGUYEN Thanh Hai**

Doctor of Philosophy in Engineering Sciences  
Institute of Fire Fighting and Prevention of Vietnam,  
Hanoi, Vietnam  
E-mail: nguyenthanhhait34@gmail.com

## FIRE HAZARD FROM SPOTTING IGNITION AT CROWN FIRES FOR POWER ENGINEERING FACILITIES

### ABSTRACT

**Purpose.** Forest fires can cause catastrophic destruction of power engineering facilities vital for national economy and security, and the breakdown of the facilities results in disruption of human life and activities. However, modern regulations do not comprise numerical values or methods for calculating safe fire distance from power engineering facilities to the forest edge. This article is devoted to the theoretical assessment of fire danger arising from spotting ignition of crown fires for power engineering facilities functioning.

**Methods.** The field non-stationary three-dimensional mathematical model for calculating heat and mass transfer parameters and a simplified method for calculating the radiant heat flux are used in the article. The system of differential equations of the field model is solved by a numerical method of control volumes.

**Findings.** The performed analysis has shown lack of regulatory requirements for safe distances from power engineering facilities to the forest edge. A comparison has been made of the calculated temperatures and velocities inside a convection column formed above the burning surface with experimental data at different heights from the ground level. The heat and mass transfer parameters are calculated at higher specific (per fire area unit) mass velocities of the combustible material gasification for the considered model ignition. The values of the safe

distance for personnel and combustible substances located on the territory of the power engineering facility are obtained.

**Research application field.** The proposed calculation method can be used to calculate the safe distances from power engineering facilities to the forest edge in case of a spot fire.

**Conclusions.** The fire hazard from spot ignition along with the well-known transfer of burning and smoldering particles of forest fuel materials for power engineering facilities consists in the increased radiant heat fluxes arising from the specific (in terms of fire area) mass burning rate significantly exceeding the corresponding value for the wood surface.

In the model spot ignition discussed above, the safe zone from the fire edge to the location of the facility's personnel, without taking the safety factor for computational accuracy into account, has exceeded 100 m, which is much more than the required (20 m) (according to Russian Federation Government Decree No. 736 of August 26, 2013 "On some issues of establishing security zones for electric grid facilities").

*Key words:* crown fire, spot ignition, power engineering facility, radiant heat flow, safe distance.

### REFERENCES

1. Gusev V.G., Kolenov E.V. Evaluation of the parameters of a convective column arising from spotted fire from a riding fire. *Sbornik nauchnykh trudov "Lesniye pozhary i borba s nimi"* [Digest of scientific papers "Forest fires and their control"]. Leningrad, Leningrad Forestry Research Institute Publ., 1986, pp. 54–66.
2. Dorrer G.A. *Dinamika lesnykh pozharov* [Dynamics of forest fires]. Novosibirsk, the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 2008. 403 p. (in Russ.).
3. Grishin A.M. About mathematical modeling of natural fires and catastrophes. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mehanika*, 2008, no. 2 (3), pp. 105–114. (in Russ.).
4. Martin J., Hillen T. The Spotting Distribution of Wildfires. *Applied Science*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 177. DOI:10.3390/app6060177
5. Kaur I., Mentrelli A., Bosseur F., Filippi J. B., Pagnini G. Turbulence and fire-spotting effects into wild-land fire simulators. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations*, 2016, no. 39, pp. 300–320.
6. Sardoy N., Consalvi J.-L., Porterie B., Fernandez-Pello A.C. Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees. *Combustion and Flame*, 2007, no. 150, pp. 151–169.
7. Cunningham P., Goodrick S.L., Hussaini M.Y., Linn, R.R. Coherent vertical structures in numerical simulations of buoyant plumes from wildland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, no. 14, pp. 61–75.
8. Puzach S.V., Goriushkin S.S. Assessment of the forest fire thermal effect on the electrical substation with oil transformers. *Pozhary i chrezvychnyye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya*, 2017, no. 3, pp. 79–83. DOI: 10.25257/FE.2017.3.79-83. (in Russ.).
9. Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Puzach V.G., Melyashinskiy M.D. Peculiarities of forming fire and explosion hazardous zones during inleakage of gaseous hydrogen into the lower part of a conditionally sealed room. *Pozhary i chrezvychnyye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya*, 2018, no. 2, pp. 58–63. DOI: 10.25257/FE.2018.2.58-63 (in Russ.).
10. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, 1980. 198 p. [Russ. ed.: Patankar S.V. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. Trans. and ed. by V.D. Vilenskii. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p.]
11. Puzach S.V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeschenii i ikh primenenie pri reshenii prakticheskikh*

*zadach pozharovzryvobezопасnosti* [Methods for calculating the heat and mass transfer in a fire at the premises and their application in solving practical problems of fire safety]. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia Publ., 2005. 336 p.

12. Koshmarov Yu.A. *Teplotekhnika* [Heat engineering]. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia Publ., 2006. 501 p.

13. Ivanov A.V. *Lesnaia pirologiia* [Forest pyrology]. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University Publ., 2010. 276 p.

14. Huin L.D. *Lesovodstvenno-ekologicheskaiа otsenka posledstviі lesnykh pozharov v lesakh iz melaleuki belodrevesnoi (Melaleuka*

*Cajuputi Powell) na iuge Vetnama* [Forest-ecological assessment of the consequences of forest fires in forests from Melaleuka Cajuputi Powell in southern Vietnam. PhD in Biological sciences diss.]. St. Petersburg, 2013. 136 p.

15. Koshmarov Yu.A. *Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Prediction of fire dynamics factors in the room]. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000. 118 p.