

*О.А. РЕМАЕВА*, канд. техн. наук, доц. ХНУРЭ (г. Харьков),  
*Т.Е. РЕМАЕВА*, аспирант ХНУРЭ (г. Харьков),  
*Е.В. ВЫСОЦКАЯ*, канд. техн. наук, доц. ХНУРЭ (г. Харьков),  
*В.Н. ЛАЩЕНОВА*, стажер-исследователь ХНУРЭ (г. Харьков)

## **ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА В ПРОИЗВОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ**

В статье рассмотрены математические модели лесных пожаров и проанализированы факторы, влияющие на скорость их распространения. Приведены расчеты основных геометрических характеристик при распространении пожара в произвольном направлении. Прогнозирование лесных пожаров позволит принимать превентивные организационные и технические меры для уменьшения риска пожара, материальных и людских потерь.

**Ключевые слова:** лесной пожар, математическая модель, геометрические характеристики распространения пожара.

**Постановка проблемы.** Исследования загрязнений окружающей среды и контроль антропогенных и природных объектов и явлений, представляющих непосредственную или потенциальную опасность для биологических систем и среды обитания, в настоящее время приобрели важное социальное и государственное значение. Наиболее опасными для человечества являются космические и техногенные катастрофы, в результате которых возникают массовые крупномасштабные пожары. Пожары наносят существенный вред окружающей среде: прерывается естественный процесс лесо- и почвообразования; гибнут целые массивы древесных пород, что может привести к существенным климатическим изменениям; продукты горения загрязняют речные воды; происходит радиоактивное загрязнение территорий в результате переноса радионуклидов продуктами горения. Наибольшее по масштабам негативное влияние на окружающую среду имеют лесные и степные пожары. Факторы влияния таких пожаров на окружающую среду весьма разнообразны и носят различный физический характер. В связи с вышеперечисленным, изучение лесных пожаров является важной и актуальной задачей. Экспериментальное изучение лесного пожара является дорогостоящим, при этом не представляется возможным проводить полное физическое моделирование, поэтому большой интерес представляют теоретические методы исследования.

**Анализ литературы.** На сегодняшний день существует большое количество работ по моделированию лесных пожаров. Одни из них основаны на физике горения, другие – на статистических данных о реальных пожарах. Все математические модели лесных пожаров согласно Веберу условно можно разделить на: эмпирические (или статистические), полуэмпирические и

физические. Успешность применения статистических моделей ограничена условиями, подобными тем, при которых происходили реальные пожары. Следует отметить канадскую, австралийскую методики оценки пожарной безопасности. Их достоинствами является простота и достаточно хорошее качество прогноза, но в пределах территории, по которой проводился статистический анализ лесных пожаров. Отсутствие физической основы подчеркивает изначальную неадекватность эмпирических моделей: они не могут быть экстраполированы за пределами тех условий, для которых были сформулированы [1].

Модель Байрама, экспериментально-теоритическая по своему подходу, также основана на измерениях, сделанных при экспериментальных пожарах в реальных лесных условиях. Она определяет соотношение между длиной пламени, долей расходуемого горючего и теплотой сгорания. Недостатком модели, является то, что в состав входных переменных включены составляющие, которые могут быть измерены только в процессе горения, например, длина пламени.

Модель Ван Вагнера основана на концепции, что радиация пламени – важнейший из факторов в механизме распространения огня. Ее основными входными параметрами являются длина пламени, запас горючего на единице площади, интенсивность радиации, испускаемой пламенем, доля радиации, поглощаемая горючим, влажность горючего и угол наклона пламени к слою горючего. В этой модели, как и в предыдущей, часть входных переменных не может быть измерена. Математические модели скорости распространения огня Э.В. Конева и А.И. Сухина отображают механизм теплообмена при горении некоторых растительных материалов [2 – 5].

Анализ существующих физических моделей пожара [6] показал, что в настоящее время много сделано в направлении изучения физических основ горения при лесных пожарах. Физические модели универсальны, так как учитывают любые природные условия, влияние антропогенной нагрузки, позволяют описать процессы тепло- и массообмена, фазовые и химические превращения при горении, а также движение газовых потоков, вызванных этими процессами. Однако на практике они используются редко, поскольку требуют большого количества разнородных исходных данных и сложны для расчетов.

Полуэмпирические модели комбинируют методики статистики и физического моделирования. Эти модели характеризуются тем, что они постулируют тепловой поток и тепло, необходимое для зажигания, без строгого рассмотрения, как режима передачи тепла, так и механизма поглощения тепла (теплопередача, конвекция или излучение). Различные константы, отвечающие за изменение теплового потока и поглощение, обычно определяются экспериментально.

Наиболее важная полуэмпирическая модель была создана Ротермелом, и положена в основу многих систем прогноза в США и в других странах. Модель была разработана для предсказания скорости распространения огня во фронте пожара в зависимости от лесного горючего материала, погоды и особенностей рельефа. Несмотря на отдельные критические замечания, модель Ротермела

следует признать одной из наиболее удачных экспериментально-аналитических моделей, предназначенных для расчета скорости распространения огня по лесным горючим материалам. Модель Ротермела имеет определенные преимущества по сравнению с иными моделями: небольшое количество входных данных, реальная возможность измерения входных параметров, сравнительная простота расчетов, универсальность использования модели, наглядность полученных результатов [7]. Кроме того, модель Р. Ротермела была включена в Национальную систему определения пожарной безопасности США, где прошла проверку в течение многих лет. А высокая точность и универсальность модели делает ее важным инструментом при решении многих прикладных задач.

Исходным предположением этой модели является допущение о том, что скорость распространения пламени пропорциональна отношению энергии, выделяемой при сгорании, к энергии, требуемой для нагрева новых порций горючего материала до температуры воспламенения. Однако модель Ротермела позволяет рассчитывать величину скорости распространения пламени только в направлении ветра.

**Целью работы** является оценка основных геометрических характеристик распространения пожара в произвольном направлении.

**Оценка основных геометрических характеристик пожара.** Для моделирования распространения пламени в произвольном направлении будем использовать индикатрису ветра

$$\chi(\alpha, \omega) = \frac{\exp[a(\omega) \cdot (\cos \alpha - 1)]}{\sqrt{1 + a^2(\omega) \cdot \sin^2 \alpha \cdot (\cos \alpha - 1)^2}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между направлениями ветра и нормалью контура пожара;

$\omega$  – скорость ветра;

$$a(\omega) = 0.785 \cdot \omega - 0.106 \cdot \omega^2.$$

Индикатрисса ветра  $\chi(\alpha, \omega)$  обладает следующими свойствами [8]:

- 1)  $\chi(\alpha, \omega) = 1$  при  $\alpha = 0$ ;
- 2)  $\chi(\alpha, \omega) < 1$  при  $\omega > 0, \alpha \neq 0$ ;
- 3)  $\chi(\alpha, \omega) = \chi(-\alpha, \omega)$  при  $0 \leq \alpha \leq \pi$ ;
- 4)  $\chi(\alpha, \omega) = 1$  при  $-\pi \leq \alpha \leq \pi$ .

При аналитическом подходе к моделированию контура пожара кромка пожара рассматривается как изотерма, соответствующая характерной температуре горения. Уравнения контура пожара для различных моментов времени  $t$  в декартовых координатах можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 x(\alpha, t) &= R_0 \cos \alpha + vt[\chi_n(\alpha, \omega) \cos \alpha - \frac{\partial \chi(\alpha, \omega)}{\partial \alpha} \sin \alpha]; \\
 y(\alpha, t) &= R_0 \sin \alpha + vt[\chi_n(\alpha, \omega) \sin \alpha + \frac{\partial \chi(\alpha, \omega)}{\partial \alpha} \cos \alpha],
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $R_0$  – начальный радиус очага возгорания;

$v$  – скорость распространения пожара.

Длина контура пожара  $L(t)$ , развивающегося из кругового очага радиуса  $R_0$

$$L(t) = 2 \int_0^t \int_0^\pi \sqrt{(R_0 + v \cdot \chi(\alpha, \omega) \cdot t)^2 + (v \cdot t \cdot \frac{\partial \chi(\alpha, \omega)}{\partial \alpha})^2} d\alpha dt, \tag{3}$$

откуда для точечного начального очага ( $R_0 = 0$ ), получим

$$L(t) = 2v \cdot t \int_0^\pi \sqrt{\chi_n^2(\alpha, \omega) + \left(\frac{\partial \chi_n(\alpha, \omega)}{\partial \alpha}\right)^2} d\alpha. \tag{4}$$

Соответственно площадь  $S(t)$ , пройденная пожаром на момент времени  $t$  определяется как

$$S(t) = vt \int_0^\pi \chi_n^2(\alpha, \omega) \cdot \sqrt{[R_0 + v \cdot \chi_n(\alpha, \omega) \cdot t]^2 + [v \cdot t \cdot \frac{\partial \chi_n(\alpha, \omega)}{\partial \alpha}]^2} d\alpha, \tag{5}$$

а при  $R_0 = 0$

$$S(t) = v^2 t^2 \int_0^\pi \frac{\chi_n^2(\alpha, \omega)}{1 + a^2(\omega) \cdot \sin^2 \alpha (\cos^2 \alpha - 1)} d\alpha. \tag{6}$$

Площадь, занимаемая непосредственно кромкой горениям  $S_l(t)$ , вычисляется путем интегрирования по контуру пожара

$$S_l(t) = \int_{L(t)} x(l) dl, \tag{7}$$

где  $x(l)$  – ширина кромки горения на локальном участке.

Таким образом, на основе зависимостей (3) – (7) можно оценить основные геометрические характеристики пожаров в зависимости от времени его существования.

**Выводы.** Моделирование лесных пожаров позволяет определить предельные условия их распространения, при реализации которых горение прекращается. Знание этих условий позволяет разрабатывать новые

технологии борьбы с лесными пожарами, то есть предопределяет технический прогресс в области охраны и защиты леса от пожаров.

Прогноз изменения во времени геометрии лесного пожара необходим для разработки и реализации плана борьбы с лесными пожарами. При этом основными потребителями результатов расчетов являются руководители предприятий лесного хозяйства и баз авиационной охраны лесов.

Прогнозирование лесных пожаров позволит принимать превентивные организационные и технические меры для уменьшения риска пожара, материальных и людских потерь, а также избежать катастрофических последствий для большинства охраняемых объектов.

**Список литературы:** 1. *Гвоздь В.М.* Алгоритм прогнозирования опасных факторов пожара // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. трудов. – Харьков: ХГУВВ, 2001. – С. 10–14  
2. *Ходаков В.Е., Граб М.В.* Моделирование распространения лесных пожаров // Вестник ХГТУ. – 2003. – № 2 (18). – С. 160–164. 3. *Кулешов А.А., Тишкин В.Ф.* Математическая модель лесных пожаров // Математическое моделирование и проблемы экологической безопасности. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 2000. – С. 137–142. 4. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1992. – 408 с. 5. *Самарский А.А., Михайло А.П.* Математическое моделирование. – М.: Физматлит, 2001. – 346 с. 6. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. – 277 с. 7. *Харченко І.* Розвиток методології досліджень і випробувань у сфері пожежної безпеки // Пожежна безпека. – 2003. – № 1. – С. 9–11. 8. *Доррер Г.А.* Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 161 с.

УДК 681.3:007.52

**Оцінка основних геометричних характеристик розповсюдження пожежи у довільному напрямку / Ремасва О.О., Ремасва Т.Є., Висоцька О.В., Лашонова В.Н.** // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 13. – С. 133 – 137.

У статті розглянуті математичні моделі лісних пожеж та проаналізовані фактори, які впливають на швидкість розповсюдження лісних пожеж. Приведені розрахунки основних геометричних характеристик при поширенні пожежі в довільному напрямі. Прогнозування лісних пожеж дозволить вживати превентивні організаційні та технічні заходи для зменшення ризику пожеж, матеріальних та людським втрат. Бібліогр.: 8 назв.

**Ключові слова:** лісна пожежа, математична модель, геометричні характеристики при поширенні пожежі.

UDC 681.3:007.52

**Estimation of basic geometrical descriptions of fire distribution / O.A. Remaeva, T.E. Remaeva, E.V. Visotskay, V.N. Lachenova.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2009. – №. 13. – P. 133 – 137.

In the article are considered mathematical models of forest fires and analysed factors which influence on speed of distribution of forest fires. The resulted calculations of basic geometrical descriptions are at distribution of fire in arbitrary direction. Prognostication of forest fires will allow taking preventive organizational and technical measures for diminishing of fires material risk and humen losses. Refs: 8 titles

**Keywords:** forest fire, mathematical model, geometrical descriptions of fire distribution.

*Поступила в редакцію 29.04.2009*