

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

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА ПРИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРАХ

Аннотация. Разработана детерминированно-вероятностная модель для оценки пожарной безопасности населенного пункта при лесных пожарах на прилегающей территории. Пожарная опасность лесной территории определяется с учетом свойств лесного горючего материала, метеорологических условий, грозовой активности и антропогенной нагрузки. Представлены результаты расчетов вероятности возникновения городского пожара.

Ключевые слова: безопасность, лесная пожарная опасность, городской пожар, вероятность.

N.V. Baranovskiy

MODEL FOR EVALUATION OF FIRE SAFETY OF SETTLEMENT IN FOREST FIRES

Abstract. The deterministic-probabilistic model of settlement fire safety estimation under forest fire conditions on adjacent territories is developed. Fire danger of forest territory is determined taking into account properties of forest fuel, meteorological conditions, storm activity and anthropogenous loading. Results of calculations of city fire probability are submitted.

Key words: safety, forest fire danger, city fire, probability.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 22 июля 2010 г.

Введение

Лесные пожары угрожают безопасности населенных пунктов, особенно сельских [1, 2]. Известны примеры перехода лесного пожара на территорию поселков и городов [3]: а) в штате Южная Австралия в 1983 году в результате активности лесных пожаров было уничтожено 400 домов; б) в штате Виктория сгорело несколько поселков (около 2000 домов) и погибли десятки людей; в) в окрестностях Лос-Аламосской национальной лаборатории возник лесной пожар, который перекинулся на город и уничтожил более 200 домов; г) январские лесные пожары принесли в 2003 году в столицу Австралии г. Канберру огненный шторм. Тогда сгорело около 500 домов, 250 человек получили ожоги, имелись погибшие.

Разработка детерминировано-вероятностной модели для прогноза пожарной безопасности населенного пункта при пожарах на прилегающей лесной территории будет способствовать созданию информационных систем безопасности, которые позволят потенциальному эксперту, принимающему стратегические решения лицу, аналитику или статистику перейти от использования чисто статистических оценок или чисто детерминированных моделей зажигания пожароопасных материалов при оценке рисков пожаров к детерминированно-вероятностным моделям и сценарному моделированию.

Характеристика лесного пожара

Фронт лесного пожара имеет сложную структуру, в которой могут быть выделены зоны нагрева, сушки, высокотемпературного испарения терпеновых соединений (в хвойных лесах), пиролиза лесных горючих материалов (ЛГМ), горения газообразных горючих продуктов пиролиза, а также догорания коксового остатка. Схема фронта лесного пожара представлена на рис. 1.

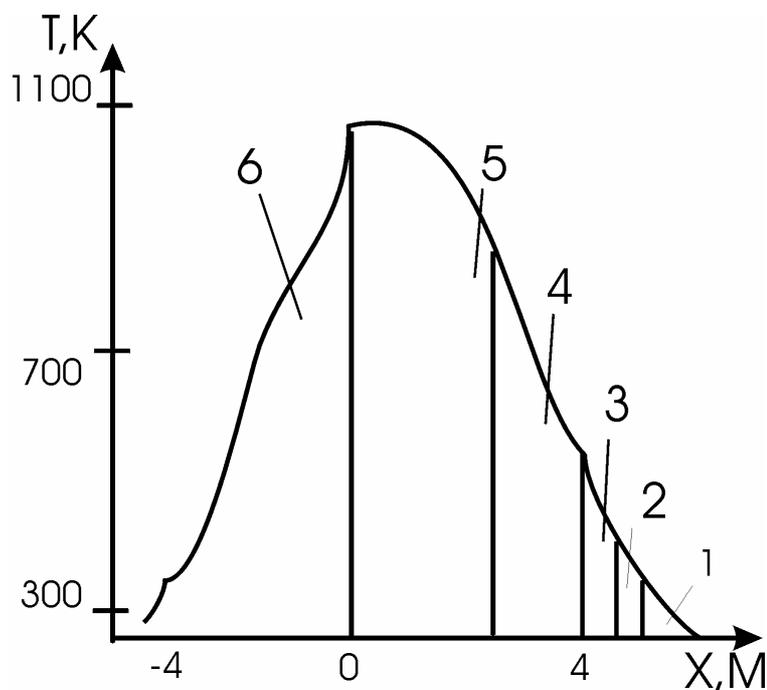


Рис. 1. Структура фронта лесного пожара:
1 – нагрев ЛГМ, 2 – сушка (испарение влаги), 3 – высокотемпературное испарение терпеновых соединений, 4 – пиролиз ЛГМ, 5 – горение газообразных продуктов пиролиза, 6 – догорание коксового остатка ЛГМ

Основные механизмы передачи тепла при лесном пожаре – это излучение и конвекция [4]. Это основные поражающие факторы лесного пожара вызывающие возникновение пожара в населённом пункте. Кроме того, из фронта лесного пожара выносятся горящие частицы ЛГМ, перенос которых возможен на относительно большие расстояния (до 300 м и больше) [1, 3]. Такие частицы могут явиться причиной зажигания построек в населенном пункте. Лесные пожары могут переходить в огненный шторм [5], который может являться одной из стадий массовых пожаров. Огненный шторм имеет малую вероятность и те же поражающие факторы и поэтому отдельно не рассматривается. Схема перехода лесного пожара на населенный пункт представлена на рис. 2.



Рис. 2 Схема перехода лесного пожара на населенный пункт

Детерминированно-вероятностная модель пожарной безопасности населенного пункта

Мировую огласку получил лесной пожар Cerro Grande (май 2000 года). Пожар возник в результате выхода из-под контроля предписанных выжиганий в окрестности Лос-Аламоса [6]. В результате пожара огнем пройдено почти 48 000 акров (1 акр = 4840 кв. ярдам = 4046,86 м²), уничтожено или повреждено более 280 домов, 40 помещений в структуре Лос-Аламосской Национальной Лаборатории (LANL), оцененный ущерб составил около 1 млрд долларов [7].

Известна формула для определения вероятности городского пожара [8]:

$$P(\text{ГП}) = P(\text{ЛП})P(\text{ГП/ЛП}), \quad (1)$$

где $P(\text{ГП})$ – вероятность городского пожара;

$P(\text{ЛП})$ – вероятность лесного пожара на прилегающей к населенному пункту лесопокрытой территории;

$P(\text{ГП/ЛП})$ – вероятность городского пожара при условии, что возникает лесной пожар.

$P(\text{ЛП})$ может быть определена согласно различным вариантам детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности [9], а условная вероятность может быть определена из статистических данных по следующей формуле:

$$P(\text{ЛП/ГП}) \approx \frac{N_{\text{ГП}}}{N_{\text{ЛП}}} \quad [10],$$

где $N_{\text{ЛП}}$ – общее число лесных пожаров;

$N_{\text{ГП}}$ – число лесных пожаров, перешедших в городские.

Такой подход определяет условную вероятность городского пожара через частоту событий и может давать ошибки в конкретной ситуации. Следует добавить детерминированную составляющую в данную методику. Введем события:

Γ_1 – зажигание построек в населенном пункте в результате переноса тепла излучением,

Γ_2 – зажигание построек в населенном пункте в результате переноса тепла конвекцией,

Γ_3 – зажигание построек в населенном пункте нагретыми до высоких температур частицами.

Данные события могут иметь место одновременно и являются совместными. Может быть получена более простая формула, если предположить, что эти события независимы и выразить условную вероятность городского пожара через противоположное событие. В итоге получим формулу:

$$P(\Gamma_{III}/III) = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P(\Gamma_i)). \quad (2)$$

Вероятность зажигания городских построек в результате конкретного механизма может быть определена через частоту событий:

$$P(\Gamma_i) = \frac{N_{3i}}{N_{Oi}}, \quad (3)$$

где N_{3i} – число вариантов расчёта, когда произошло зажигание построек в населенном пункте;

N_{Oi} – общее число вариантов расчета зажигания построек в населенном пункте в результате действия i -го механизма передачи тепла.

Входные параметры для численного расчета процесса зажигания материала построек задаются с помощью генератора случайных чисел. Кроме того, могут быть использованы экспериментальные и статистические данные.

Возможно, следует разработать методику расчета условной вероятности городского пожара, которая бы учитывала одновременно как результаты численных расчетов, так и экспериментальные и статистические данные.

Для программной реализации модуля зажигания материала построек частицами может быть адаптирована математическая модель зажигания слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей [12]. Рассмотрим сценарий зажигания постройки в населенном пункте в результате действия конвективного механизма передачи тепла (модельный пример). Область решения для элемента конструкции представлена на рис. 3. Чтобы было возможно продемонстрировать работу методики на модельных примерах, приведем простую математическую модель зажигания деревянной постройки набегающим разогретым потоком газа

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$t = 0 \quad T = T_0, \quad (5)$$

$$x = 0 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T_{e1} - T), \quad (6)$$

$$x = x_{end} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T_{e2} - T), \quad (7)$$

где ρ , c , λ , T – плотность, теплоемкость, теплопроводность и температура элемента конструкции;

t – время;

x – пространственная координата;

α – коэффициент теплоотдачи; индексы "0", "e", "1" и "2" соответствуют параметрам в начальный момент времени внешней среды, параметрам на левой и правой границах элемента конструкции.

В качестве критериев зажигания использованы данные по тепловому потоку к поверхности зажигания и температуре этой поверхности [13]. Считается, что зажигание произошло, когда и тепловой поток к поверхности и ее температура будут равны или больше определенных критических значений. В качестве критериев зажигания при сценарном моделировании используются данные табл. 1, а именно для значения времени задержки зажигания 0,4 с (рассматривается катастрофический сценарий).

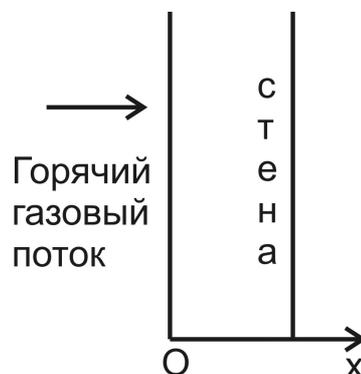


Рис. 3. Область решения для элемента конструкции

Детерминированная модель на основе решения уравнения теплопроводности приведена только для того, чтобы продемонстрировать технологию типичного расчета вероятности перехода лесного пожара на населенный пункт. Модель совершенно не претендует на самостоятельный научный результат и полноту охвата физических процессов, протекающих при зажигании конструкционных материалов. В реальной ситуации следовало бы учитывать варианты покрытия древесины огнезащитными составами или лакокрасочными материалами, многослойность конструкции, механизмы химического взаимодействия [14] и т.д. Подобные подходы решения уравнения теплопроводности в конденсированной фазе используются, например, в рамках феноменологической теории нестационарного горения пороха [15, 16]. Предполагается, что специалист-исследователь, работающий с одной или несколькими детерминированными моделями зажигания, возьмет за основу вероятностную модель (1)-(3) и подход использования генератора случайных чисел и будет получать вероятностные оценки безопасности какого-либо объекта или населенного пункта.

Сценарное моделирование пожарной опасности

Модельные расчеты проведены на примере пос. Тимирязево Томской области и Тимирязевского лесхоза Томской области [17]. Преобладающая порода – сосна [18]. Время сушки слоя ЛГМ определяется с помощью математической модели [19]. С помощью генератора случайных чисел варьировались следующие параметры: $T_{e1} \in [700 - 1200 \text{ K}]$ [15, 25, 26], $\alpha_1 \in [60 - 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$, $T_0, T_{e2} \in [15 - 30 \text{ K}]$. Фиксировался коэффициент теплоотдачи на правой границе $\alpha_2 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Материал конструкции – древесина сосны [13]: $\rho = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c = 1670 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\lambda = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Данные по параметрам зажигания приведены в табл. 1. Аналогичный подход к определению условий зажигания использован в работе [20].

Таблица 1

Экспериментальные данные по условиям зажигания древесины сосны [13]

Время задержки зажигания, с	Тепловой поток, кВт/м ²	Температура поверхности, К
63,5	12,5	658
45,0	21	700
11,1	42	726
2,6	84	773
0,4	210	867

Для численных расчётов приняты следующие сценарии: низовой пожар характеризуется $\alpha_1 = 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, верховой – $\alpha_1 = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, огненный шторм – $\alpha_1 = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Поскольку решение рассматриваемой задачи о зажигании носит демонстрационный характер (то есть демонстрирует, что и как надо посчитать, чтобы применять предлагаемую методику), то и коэффициенты теплоотдачи имеют гипотетические значения. Они только качественно отражают физику явления, учитывая такой параметр, как скорость набегающего потока [21]. Самая низкая скорость набегающего потока будет у низового лесного пожара. Затем в порядке возрастания верховой пожар и огненный шторм. Чем выше скорость набегающего потока, тем большее значение коэффициента теплоотдачи принимается.

В табл. 2 представлены результаты расчета условной вероятности перехода лесного пожара в городской Р(ГП/ЛП), полученные в результате 150 вариантов расчета для каждого сценария. На рис. 4 представлены модельные зависимости вероятности пожара в населенном пункте, когда на прилегающей лесопокрытой территории возможно возникновение пожаров.

Таблица 2

Условная вероятность перехода лесного пожара в городской

Сценарии	Р(ГП/ЛП)
Низовой пожар	0,33
Верховой пожар	0,49
Огненный шторм	0,58

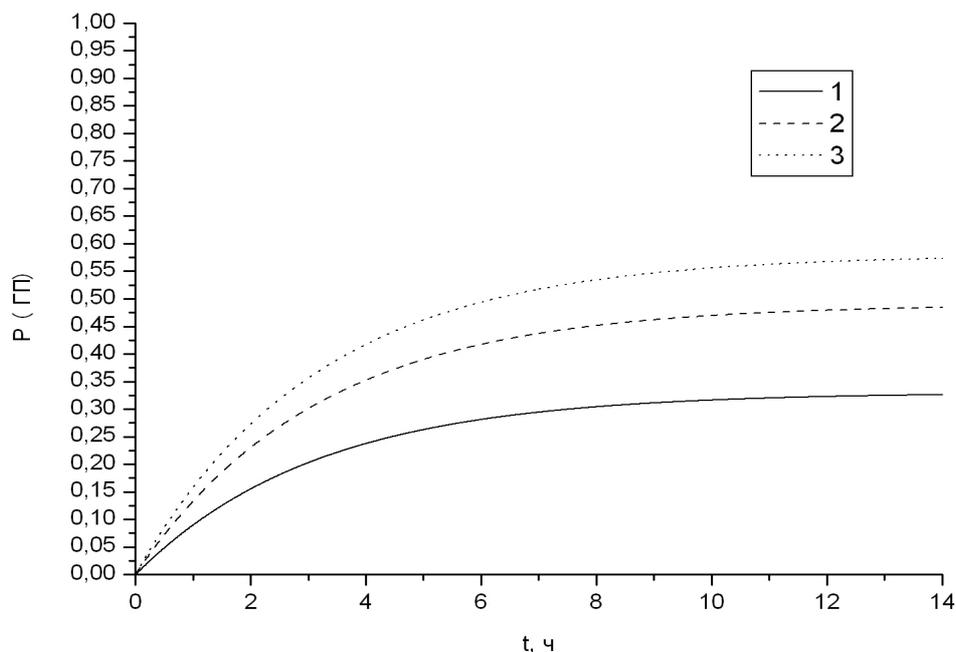


Рис. 4. Зависимость вероятности городского пожара при условии, что на прилегающей территории действует:
1 – низовой пожар, 2 – верховой пожар, 3 – огненный шторм

Вероятностная часть методики на модельных расчетах по демонстрационной детерминированной модели показывает адекватные результаты – самую большую вероятность имеет сценарий огненного шторма, затем верховой и низовой пожары. Соответствует физике процесса увеличение вероятности городского пожара с течением времени, так как происходит высушивание ЛГМ на прилегающей территории. Для практического применения могут быть разработаны новые или адаптированы существующие физико-математические модели зажигания пожароопасных материалов. Кроме того, следует ввести классификацию типичных элементов конструкции, которые могут подвергнуться воздействию поражающих факторов лесного пожара.

Заключение

Разработанная автором детерминированно-вероятностная методика прогноза пожарной безопасности населенного пункта в условиях возникновения лесных пожаров на прилегающей лесопокрытой территории, в отличие от работы [10], имеет детерминированные компоненты и позволяет использовать результаты математического моделирования зажигания пожароопасных материалов. Разработка данной методики открывает перспективы создания информационно-вычислительных систем непрерывного пожарного мониторинга населенных пунктов и технологических объектов, расположенных на лесопокрытых территориях. Данная статья открывает цикл исследований по проблеме воздействия лесных пожаров на города и поселки, технологические объекты.

Рамки применимости детерминировано-вероятностного подхода [22] не ограничиваются тематикой лесных пожаров и их последствий. Точно так же аналогичные формулы можно применять для оценки наводнений, цунами, авиакатастроф и других опасных событий и явлений.

Литература

1. **Михалев Ю.А., Ряполова Л.М.** Защита таежных поселков от лесных пожаров // Лесное хозяйство. 2003. № 3. С. 40- 41.
2. **Валендик Э.Н., Бычков В.А., Кисляхов Е.К., Верховец С.В.** Лесные пожары в припоселковых борах // Лесное хозяйство. 2002. № 1. С. 46-48.
3. **Теребнев В.В., Артемьев Н.С., Подгрушный А.В.** Противопожарная защита и тушение пожаров. Книга 5. Леса, торфяники, лесосклады. М.: Изд-во "Пожнаука", 2007. 358 с.
4. **Гришин А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
5. **Строкатов А.А.** Физическое моделирование огненных и тепловых смерчей. Автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 2007. 20 с.
6. **Cerro Grande prescribed fire.** Investigation report. Idaho: National Interagency Fire Center. 2000. 134 p.
7. **Fire management: Lessons learned from the Cerro Grande (Los Alamos) fire and actions needed to reduce fire risks (GAO/T-RCED-00-273).** US: GAO, 2000. 53 p.
8. **Fried J.S., Winter G.J., Gilless J.K.** Assessing the benefits of reducing fire risk in the Wildland-Urban Interface: A contingent valuation approach // International Journal of Wildland Fire. 1999. Vol. 9. № 1. P. 9-19.
9. **Барановский Н.В.** Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 59-61.
10. **Барановский Н.В.** Детерминированно-вероятностная модель перехода лесного пожара на населенный пункт // Экологические системы и приборы. 2007. № 3. С. 59-63.
11. **Назаров А.А., Терпугов А.Ф.** Теория вероятностей и случайных процессов: Учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ. 2006. 204 С.
12. **Кузнецов Г.В., Барановский Н.В.** Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2006, т. 15. № 4. С. 42-46.
13. **Определение** зон безопасного применения твердотопливных генераторов пожаротушающих аэрозолей // Вопросы специального машиностроения / Заболотный А.Е., Заболотная М.М., Заболотная Ю.А., Тимошин В.Н.. 1995. Вып. 7-8. С. 15-21.
14. **Расчёты** толщин огнезащиты, обеспечивающих требуемые показатели пожарной опасности деревоклееных конструкций / Корольченко А.Я., Гаращенко А.Н., Гаращенко Н.А., Рудзинский В.П. // Пожаровзрывобезопасность. 2008, т. 17. № 3. С. 49-56.
15. **Новожилов Б.В.** Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973. 176 с.
16. **Новожилов Б.В., Каганова З.И., Беляев А.А.** Эрозионное горение пороха в поле бегущей волны // Химическая физика. 2007, т. 26. № 3. С. 34-41.
17. **Генеральный** план противопожарного устройства лесов / Маценко В.В., Соколов А.Я., Калинин С.И., Андриянова Ф.И., Андреева Т.А., Ананьин С.В., Крылов М.Н., Казанцева Л.В. Том 1. Пояснительная записка. 5-99.14-17-ПМ. Барнаул: Государственный проектно-изыскательский институт "Росгипролес", Алтайский филиал, 1999. 139 с.
18. **Паневин В.С.** Леса и лесное хозяйство Томской области: Учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 2006. 126 с.
19. **Гришин А.М., Барановский Н.В.** Сравнительный анализ простых моделей сушки слоя ЛГМ, включая данные экспериментов и натуральных наблюдений // Инженерно-физический журнал. 2003, т. 76. № 5. С. 166-169.
20. **Бельцова Т.Г., Корольченко О.Н.** Показатели воспламеняемости огнезащитной древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2008, т. 17. № 4. С. 31-33.
21. **Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К.** Взаимодействие материалов с газовыми потоками / Под ред. В.С. Зуева. М.: Машиностроение, 1975. 224 с.
22. **Кузнецов Г.В., Барановский Н.В.** Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 с.