

УДК 614.84

*Ю.А. Абрамов, д-р техн. наук, профессор, проректор АПБУ,
А.А. Тарасенко, ст. преподаватель, АПБУ*

ЛЕСНОЙ ПОЖАР КАК ВЕТВЯЩИЙСЯ ПРОЦЕСС. СЛУЧАЙ ВЫРОЖДЕНИЯ

В работе рассматривается описание развития лесного пожара как случайного ветвящегося процесса. Рассмотрен случай, когда скорость передней кромки пожара меньше, чем скорость задней.

Одним из ключевых вопросов тактики борьбы с лесными пожарами является прогноз пределов распространения огня и смежный ему вопрос о вероятности достижения пожаром точки с заданными координатами. Считая процесс распространения пожара случайным, рассмотрим вероятность самолокализации пожара, которая имеет место при определенных значениях физических параметров или характеристик горючей среды. В первую очередь к числу характеристик слоя растительного горючего материала (РГМ) относятся: запас, теплотворная способность, насыпная плотность, влагосодержание, доля негорючей компоненты, степень дисперсности частиц, формирующих слой. Кроме того, это могут быть параметры, не имеющие непосредственно отношения к слою РГМ – скорость ветра, угол склона, температура и влажность воздуха. Все вышеперечисленные факторы, согласно [1, 2] влияют на скорость распространения огня, поэтому самолокализацию пожара можно трактовать в терминах скоростей передней и задней кромки фронта пожара. В частности, самолокализация возможна в том случае, когда передняя кромка достигает негорючего препятствия (тогда ее скорость становится равной нулю), либо когда распространение пожара происходит в таких физических условиях, при которых скорость передней кромки огня ниже скорости задней кромки. В первом случае имеет место пространственная неоднородность, в то время как во втором случае имеют место однородные условия. Реализация таких условий предполагаются ниже.

В работе [3] нами получена модель площади пожара в виде случайного целочисленного ветвящегося процесса гибели и размножения [4]. При этом характер модели предполагает следующие ограничения – растительное горючее вещество непрерывно распределено однородным слоем по горизонтальной плоскости, внешние воздействия на процесс распространения отсутствуют. При

таких условиях имеет место низовой лесной (либо степной) пожар при отсутствии ветра, развивающийся на равнинном участке. В модели используются следующие допущения – слой РГВ дискретизируется путем разбиения на ячейки с плотностью c , которые могут целиком находиться в одном из трех возможных состояний – не горевшем, горящем, сгоревшем. Пожар начинается с одной ячейки. Область пожара $S(t)$ представляет собой объединение множества ячеек, находящихся в горящем состоянии. При этом каждая новая загорающаяся ячейка загорается от одной (не от двух, трех и т.д.) горячей. Каждая горящая ячейка с интенсивностью λ поджигает соседние ячейки и с интенсивностью μ потухает. При этом λ можно трактовать как среднее количество ячеек, поджигаемых от одной горячей за единицу времени, а μ - как величину обратную среднему времени горения одной ячейки. При этом само время горения является случайной величиной с показательной плотностью распределения. Для того чтобы применить аппарат ветвящихся процессов, который требует равенства интенсивности воспламенения для каждой ячейки, с реальной геометрией пожара, где воспламенение не горящих ячеек происходит только лишь от находящихся на внешнем периметре пожара горящих ячеек, целесообразно ввести интенсивности λ и μ зависящими от времени. Аппарат неоднородных ветвящихся процессов [4] позволяет использовать такое допущение.

В работе [3] были получены выражения для $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ в предположении, что областью пожара является расширяющееся кольцо с радиальной скоростью передней кромки V_λ и задней V_μ . Эти выражения имеют вид

$$\lambda(t) = \frac{\pi c V_\lambda^2 t}{\pi c V_\lambda^2 t^2 + 1}. \quad (1)$$

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ \frac{2\pi c V_\mu^2 (t - t_0)(1 + \pi c V_\lambda^2 t t_0)}{(\pi c V_\lambda^2 t^2 + 1)(\pi c V_\lambda^2 t^2 - \pi c V_\mu^2 (t - t_0)^2 + 1)}, & t > t_0, \end{cases} \quad (2)$$

где t_0 - время задержки (момент начала затухания).

В случае, когда $V_\lambda < V_\mu$, появляется особенность в момент вырождения (самолокализации пожара) t_B . Очевидно, что после того как пожар погаснет дальнейшее его распространение становится невозможным, поэтому $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ примут вид

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\pi c V_{\lambda}^2 t}{\pi c V_{\lambda}^2 t^2 + 1}, & t < t_B; \\ 0, & t > t_B; \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0; \\ \frac{2\pi c V_{\mu}^2 (t - t_0)(1 + \pi c V_{\lambda}^2 t t_0)}{(\pi c V_{\lambda}^2 t^2 + 1)(\pi c V_{\lambda}^2 t^2 - \pi c V_{\mu}^2 (t - t_0)^2 + 1)}, & t_0 < t < t_B; \\ 0, & t > t_B; \end{cases} \quad (4)$$

Как следует из (2) и (4) функция $\mu(t)$ в отличие от $\lambda(t)$ зависит как от V_{μ} , так и от V_{λ} . Объясняется это тем, что прежде чем погаснуть, ячейка должна сначала загореться. График зависимостей $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ для случая $V_{\mu}=2$ м/мин, $V_{\lambda}=1$ м/мин, $t_0=4$ мин представлен на рисунке 1.

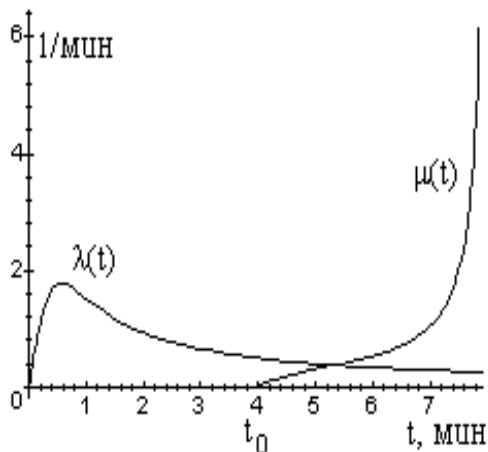


Рисунок 1 – Вид функций $\lambda(t)$ и $\mu(t)$

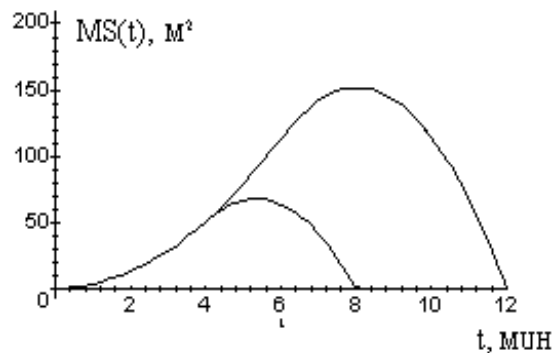


Рисунок 2 – Математическое ожидание площади пожара

Характерной особенностью поведения функции $\mu(t)$ при $V_{\lambda} < V_{\mu}$ является ее неограниченный рост в точке t_B , значение которой есть большее из решений уравнения

$$\pi c V_{\lambda}^2 t^2 - \pi c V_{\mu}^2 (t - t_0)^2 + 1 = 0. \quad (5)$$

Левая часть уравнения (5) представляет собой площадь кольца $S(t)$. Очевидно, что в момент вырождения (самолокализации) площадь

кольца будет равна 0, и, соответственно, выражение (4) неограниченно возрастет (т.е. среднее время горения каждой ячейки станет равным 0, а это означает, что пожар погаснет).

Зная $\lambda(t)$ и $\mu(t)$, можно определить числовые характеристики случайного процесса $S(t)$. Для математического ожидания ветвящегося процесса гибели-размножения известно [4]

$$MZ(t) = \exp\left(-\int_0^t [\mu(x) - \lambda(x)] dx\right), \quad (6)$$

где $Z(t)$ – количество горящих ячеек. Учитывая, что площадь пожара $S(t) = Z(t)/c$, подставляя (3) и (4) в (6), получим

$$MS(t) = \begin{cases} \pi V_\lambda^2 t^2 + 1/c, & t < t_0; \\ \pi(V_\lambda^2 t^2 - V_\mu^2 (t - t_0)^2) + 1/c, & t_0 < t < t_B; \\ 0, & t > t_B; \end{cases} \quad (7)$$

Из (7) следует, что средняя площадь пожара при $t < t_0$ равна с точностью до $1/c$ площади круга, а при $t > t_0$ – площади кольца. График $MS(t)$ для двух значений t_0 ($t_0 = 4$ мин и $t_0 = 6$ мин) представлен на рисунке 2. Очевидно, что чем больше время задержки t_0 (при одних и тех же значениях $V_\mu = 2$ м/мин, $V_\lambda = 1$ м/мин), тем шире кольцо, соответственно, больше площадь пожара, и затухание пожара наступает позже.

Для оценки достоверности прогнозируемых значений площади пожара необходимо иметь представление о дисперсии площади. Ее можно определить согласно [4]

$$DZ(t) = \exp\left(-\int_0^t [\mu(x) - \lambda(x)] dx\right) \left(2W - 1 - \exp\left(-\int_0^t [\mu(x) - \lambda(x)] dx\right)\right), \quad (8)$$

где

$$W = \exp\left(-\int_0^t [\mu(x) - \lambda(x)] dx\right) \left[1 + \int_0^t \exp\left(\int_x^t [\mu(y) - \lambda(y)] dy\right) \mu(x) dx\right]. \quad (9)$$

Подставляя в (8) и (9) выражения (3) и (4), получим дисперсию площади пожара. График дисперсии представлен на рис. 3.

Поскольку процесс распространения пожара начинается всегда с одной ячейки и заканчивается в момент вырождения отсутствием горящих ячеек, то, очевидно, что в эти моменты дисперсия равна 0.

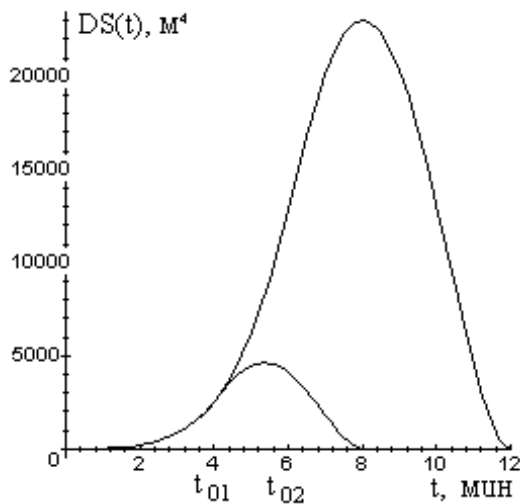


Рисунок 3 – Дисперсия площади пожара

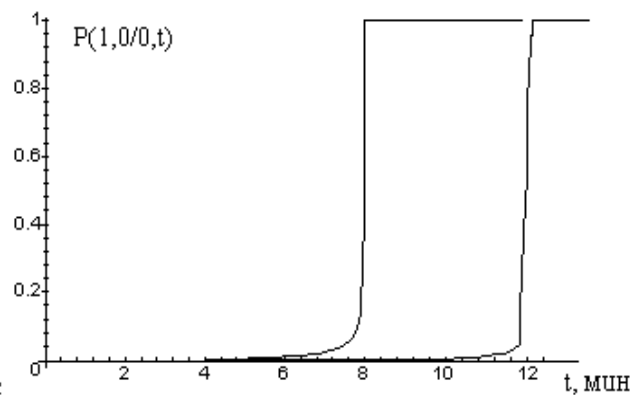


Рисунок 4 – Вероятность самолокализации пожара

Большой интерес представляет вероятность вырождения процесса (самолокализации пожара) [4]

$$P(0, t/1, 0) = 1 - \frac{e^{-\int_0^t (\mu(x) - \lambda(x)) dx}}{W}, \quad (10)$$

график которой представлен на рис. 4. Видно, что до момента t_0 вероятность затухания пожара равна 0, а в момент вырождения t_v с вероятностью 1 пожар затухает.

Кроме того, зависимость [4]

$$P(n, t) = [1 - P(0, t/1, 0)] W^{-1} \left(1 - \frac{1}{W} \right)^{n-1} \quad (11)$$

позволяет найти вероятность $P(n, t)$ того, что в момент t огнем будет охвачено ровно n ячеек. График $P(n, t)$ приведен на рис. 5, из которого видно, что в начальный момент процесс начинается с одной горячей ячейки, а в момент вырождения вероятность того, что горит 0 ячеек стремится к 1.

Просуммировав $P(n, t)$ от 1 до m , можно определить вероятность $P(n \leq m, t)$ того, что к моменту t пожаром будет охвачено не более m ячеек. График зависимости $P(n \leq m, t)$ представлен на рисунке 6. Анализ

показывает, что в момент вырождения $P(n \leq m, t) = 1$ для любых $m > 0$. Это объясняется тем, что в этот момент число горящих ячеек $n = 0$.

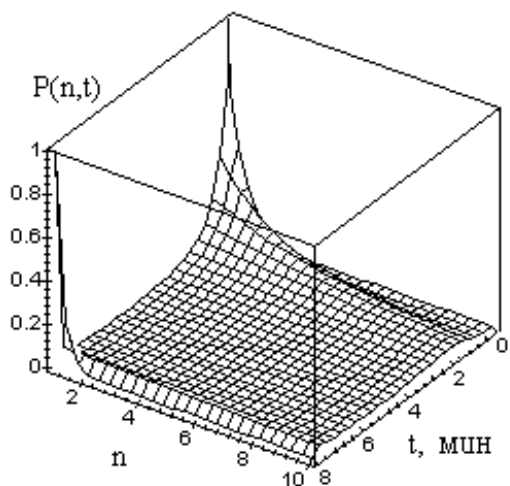


Рисунок 5 – Вероятность горения в момент t ровно n ячеек

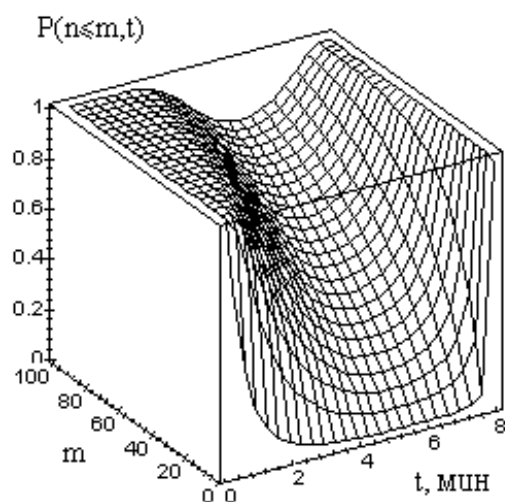


Рисунок 6 – Вероятность горения в момент t не более m ячеек

Полученные результаты расширяют класс математических моделей, описывающих процессы распространения лесных пожаров, и открывают новые возможности в разработке методов и средств борьбы с ними.

ЛИТЕРАТУРА

1 Телицын Г.П. Зависимость скорости распространения низовых пожаров от условий погоды // Сб. тр. ДальНИИЛХ, 1965, Вып. 7. – С. 391 – 405.

2 Коровин Г.Н. Методы расчета некоторых параметров низовых пожаров // Сб. научн.- исслед. работ по лесн. хоз-ву, 1969, Вып. XII.

3 Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Описание развития лесного пожара в виде случайного ветвящегося процесса // Інтегровані технології та енергозбереження. Вып. 3. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002. – С. 52 – 59.

4 Харрис Т. Теория ветвящихся случайных процессов. М.: Мир. 1966. – 356 с.

Статья поступила в редакцию 26.11.2002 г.