

УДК 539.3

# Исследования математических моделей распространения пожара для определения зависимости скорости распространения от угла наклона

© Л. Ю. Катаева<sup>1</sup>, И. Е. Белоцерковкая<sup>2</sup>

**Аннотация.** В работе рассматривается влияние угла наклона на скорость распространения пожара. За основу были выбраны модель Гришина [3]. Результаты расчетов сравнивались с известными результатами, полученными на основе моделей Доррера [1], Ротермела [2], а также с известными экспериментальными данными по моделированию пожаров на наклоненных поверхностях. В результате получена зависимость скорости распространения пожара от угла наклона подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** лесные пожары, математическое моделирование лесных пожаров.

## 1. Введение

Целью данной работы является сравнения модели Доррера, Ротермела и Гришина для определения зависимости скорости распространения от угла наклона. Данная статья подготовлена с использованием зарубежных и отечественных публикаций, описывающих модели распространения пожара [1], [2], [3]. Рассматриваемая тематика актуальна в силу того, что учет угла наклона подстилающей поверхности вносит существенный вклад в распространения огня. На настоящий момент не существует единой системы классификации моделей распространения пожаров. Согласно Веберу [4], все математические модели лесных пожаров могут быть классифицированы следующим образом: эмпирические (или статистические), полуэмпирические (или полуфизические модели), физические (или аналитические). Среди основных математических моделей прогнозирующих распространение пожаров следует выделить: модель Доррера, Ротермела и модель Гришина. Следует сказать, что эмпирические модели не делают никаких попыток учесть физические механизмы и, по сути, являются статистическими описаниями реальных или тестовых пожаров. Они не используют никакого физического моделирования для описания теплопереноса из зоны горения в еще нетронутый огнем участок. Эмпирические формулы были выведены из анализа накопленных данных о пожарах и погодных условиях. На базе их были построены, например, канадская и австралийская системы [5].

## 2. Модель Ротермела

Наиболее важная полуэмпирическая модель была создана Ротермелом [2], которая 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 (ЛГМ), погоды и особенностей рельефа. В математической модели горения, разработанной Ротермелом в 1972 году, приводится формула для определения скорости, с которой огонь будет распространяться по однородному топливному

<sup>1</sup> Доцент кафедры прикладной математики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, г. Нижний Новгород; miran\_kaspir@mail.ru.

<sup>2</sup> Ассистент кафедры прикладной математики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, г. Нижний Новгород; miran\_kaspir@mail.ru.

массиву.

$$R = \frac{I_r \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b Q_{ig} \varepsilon} \quad (2.1)$$

где  $R$  - это скорость распространения огня, измеряется в футах в минуту;  $I_r$  - это интенсивность реакции, величина энергии, высвобождаемая единицей площади фронта огня, измеряется бет/фут<sup>2</sup>/минуты;  $\xi$  - это коэффициент распространения теплового потока (отношение интенсивности реакции нагревающей смежные частицы топлива до возгорания);  $\varphi_w$  - безразмерный коэффициент, который берет в расчет влияние ветра на увеличение;  $\varphi_s$  - безразмерный коэффициент, который берет в расчет влияние наклона на увеличение;  $\rho_b$  - это величина среднего количества топлива на кубический фут топливной поверхности (фунты/фут<sup>3</sup>);  $\varepsilon$  - это значение пропорции топливных частиц нагретых до температуры возгорания в момент начала открытого горения;  $Q_{ig}$  - это средняя величина тепла необходимая для поджога фунта топлива (бет/фунт). В данной модели угол наклона поверхности определяет безразмерный коэффициент

$$\varphi_s = 5,275 \beta^{-0,3} \tan^2 \varphi$$

(где  $\beta$  - коэффициент плотности ЛГМ), который вместе с коэффициентом, отвечающим за эффективную скорость ветра  $\varphi_w$ , входит в выражение, определяющее скорость распространения. Рассмотрим модель Ротермеля при отсутствии ветра, тогда слагаемое

$$\varphi_w = 0 \rightarrow R = \frac{I_r \xi (1 + \varphi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$$

Входные данные возьмем из статьи [6]:

$$\beta = 0,6$$

$$\sigma = \left(\frac{\beta}{3,34}\right)^{0,8189} = 0,245150101$$

$$\xi = (192 + 0,259\sigma)^{-1} \exp(0,792 + 0,681\sigma^{0,5})(\beta + 0,1) = 0,01147712$$

$$\frac{I_r}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} = \frac{R}{\xi} = 69,70386253$$

На графике (5.1) видно, что с увеличением угла наклона подстилающей поверхности скорость распространения пожара увеличивается, практически линейно.

### 3. Модель Доррера

В работе [1] математическая модель распространения лесного пожара, в определенной мере учитывает взаимодействие процессов горения напочвенного покрова и ярусов растительности. Распространение процесса горения по трехмерному слою ЛГМ рассматривается в неподвижной системе координат  $x, y, z$ . Зафиксируем неподвижную точку  $C = (x, y, z)$  и выделим в ее окрестности элементарный объем  $\Delta V$ . ЛГМ в окрестностях точки  $C$  в некоторый момент времени может находиться в одном из трех состояний, описываемых функцией  $s(x, y, z, t)$ :

$$s(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, \text{ если в точке } C \text{ в момент времени } t \text{ имеется ненулевой} \\ \text{запас горючего } w(x, y, z, t) > 0, \text{ но горения не происходит;} \\ 1, \text{ если } w(x, y, z, t) > 0 \text{ и горение происходит} \\ 2, w(x, y, z, t) = 0, \text{ т.е. горение не возможно,} \end{cases}$$

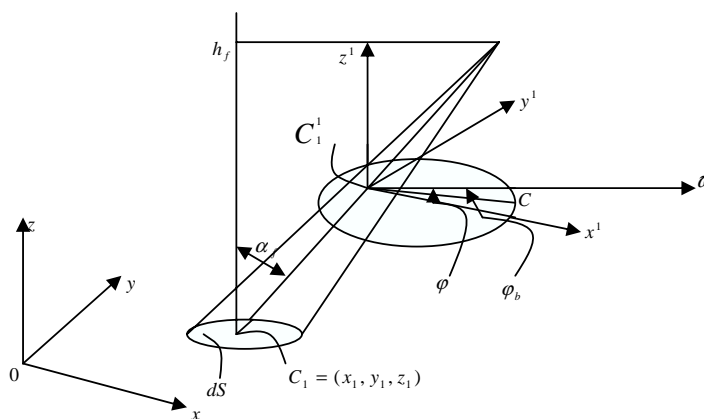
где  $w(x, y, z, t) > 0$  - ненулевой запас ЛГМ. Области, соответствующие  $s = 0, s = 1, s = 2$  Доррер обозначает соответственно  $\Omega_0(t), \Omega_1(t), \Omega_2(t)$ . В модели Доррера [1] учитывается уравнения теплового баланса в твердой фазе горючего, в каждой точке слоя ЛГМ.

$$\frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial t} = \varphi_e(x, y, z, t) - k(x, y, z)[H(x, y, z, t) - H_0(x, y, z)] + \int \int \int_{\Omega(t)} \varphi(x_1, y_1, z_1, t) \xi_\nu(x - x_1, y - y_1, z - z_1) dx_1 dy_1 dz_1 \quad (3.1)$$

Где  $H(x, y, z, t)$  - энтальпия твердой фазы ЛГМ с учетом нагревания и испарения влаги ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ );  $\varphi(x, y, z, t)$  - энергия, образующаяся при горении слоя ( $\text{Вт}/\text{м}^{-3}$ );  $\varphi_e(x, y, z, t)$  - энергия, поступающая от внешних источников ( $\text{Вт}/\text{м}^{-3}$ );  $\xi_\nu(x - x_1, y - y_1, z - z_1)$  - функция Грина, описывающая влияние теплового эффекта реакции горения, происходящей в окрестности точки  $C_1 = (x_1, y_1, z_1) \in \Omega_1$ , на скорость поглощения тепла ЛГМ в окрестности точки  $C(x, y, z) \in \Omega_0$  ( $\text{м}^{-3}$ );  $k(x, y, z)$  - коэффициент теплопотерь ( $\text{с}^{-1}$ ).

$$H(x, y, z) = H_0(x, y, z), (x, y, z) \in \Omega_0$$

где  $H_0(x, y, z)$  - начальное значение энтальпии.



Р и с у н о к 3.1

Схематическое представление локального пламени

Доррер считает, что локальное пламя, возникшее в окрестности точки  $C_1 = (x_1, y_1, z_1) \in \Omega_1$ , представляет собой конус (3.1). Конус имеет высоту  $h_f$  и отклонен от вертикальной оси  $z$  на угол  $\alpha_f$ , тогда функция влияния пламени:

$$\begin{aligned} \xi(x - x_1, y - y_1, z - z_1) &= \xi(\rho, \varphi, z - z_1) = \\ &= \frac{a_0 \eta(z - z_1)}{\cos \alpha_f} \exp^{-\frac{\rho(\varphi, z - z_1) \cos^2 \alpha_f}{p_0(1 + \sin^2 \alpha_f)(1 - \sin \alpha_f \cos(\varphi - \varphi_b))}}; \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$(x, y, z) \in \Omega_0, (x_1, y_1, z_1) \in \Omega_1, 0 \leq z, z_1 \leq \delta$$

Здесь  $(\varphi, \rho, z)$  - цилиндрическая система координат с осью  $z$ , проходящей через точку  $C_1^1$ , лежащую на оси локального пламени;  $\delta$  - толщина слоя горючего;  $\varphi$  - угол между осью  $ox$  и вектором ветра  $C_1^1 C$ ;  $\varphi_b$  - угол между  $C_1^1 C$  и вектором  $\omega$ ;  $p_0$  - характерная длина затухания ( $p_0$  может быть оценена величиной 0,05 - 2 м) при  $\alpha_f = 0$ . Величины  $h_f$  и определяются взаимодействием очага пожара с атмосферой, зависимость  $\eta(z - z_1)$ , определяющая закон ослабления теплового потока по вертикали. Параметр  $a_0$  ( $\text{м}^{-3}$ ) определяет долю выделяющегося тепла, которое идет на распространение горения [6].

Распространение горения по тонкому однородному слою.

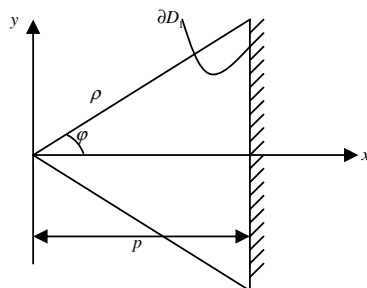
Этот частный случай может рассматриваться как модель низового лесного пожара. Для однородного слоя введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, t) &= \Phi \\ \Phi_e(x, y, t) &= 0 \\ k(x, y) &= k_{\text{при}}(x, y) \in D_1(t) \\ \varphi_b &= 0. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\delta \ll p_0$  получим уравнение нагрева горючего:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(x, y, t)}{\partial t} &= a_0 \Phi_e \delta \left(1 + \frac{\delta}{3h_f}\right) \int \int_{D_1(t)} \exp^{-\frac{\rho \cos^2 \alpha_f}{p_0(1+\sin^2 \alpha_f)(1-\sin \alpha_f \cos \varphi)}} \rho d\rho d\varphi - \\ &- k[H(x, y, t) - H_0(x, y)] \\ H(x, y, t) &= H_0(x, y)(x, y) \in D_0(t) \end{aligned} \tag{3.3}$$

Так как область  $D_1(t)$  произвольная, то интеграл может быть определен численно. Для оценки взаимодействия ЛГМ в окрестности точки  $C$  с областью  $D_1$  достаточно уметь рассчитывать интегралы (3.4) для элементарных участков границы сравнительно простой конфигурации.



Р и с у н о к 3.2

Схема границы пожара.

Функция учитывающая влияние геометрии участка фронта на теплопередачу в окрестность точки  $C \in D_0$  (3.2)

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho} = \cos \varphi \rightarrow \rho &= \frac{p}{\cos \varphi} \\ \Theta(\alpha_f, p) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{p}{\cos \varphi}}^{\infty} \exp^{-\frac{\rho \cos^2 \alpha_f}{(1+\sin^2 \alpha_f)(1-\sin \alpha_f \cos \varphi)}} \rho d\rho d\varphi \end{aligned} \tag{3.4}$$

Если в момент времени  $t^* = \frac{p_0}{v}$  энтальпия в точке  $C$  достигает критического значения  $H(x, y, t^*) = H^*(x, y)$  и происходит воспламенение ЛГМ, тогда из уравнения (3.3) с учетом (3.4) переписывается:

$$\frac{H^*(x, y) - H_0(x, y)}{\pi a_0 p_0^2 \delta \Phi \left(1 + \frac{\delta}{3h_f}\right)} = \int_0^{\frac{p_0}{v}} \exp^{-k\left(\frac{p_0}{v}\right) - \tau} [\Theta(\alpha_f, \frac{p_0 - v\tau}{\rho_0}) - \Theta(\alpha_f, \frac{p_0 - v\tau + \frac{v}{\Gamma}}{\rho_0})] d\tau \tag{3.5}$$

$$(x, y) \in D_0$$

Выражение (3.5) дает связь между параметрами модели при установившемся движении фронта. В частности, если известны все параметры кроме  $\omega$ , то его можно рассматривать как интегральное уравнение относительно  $\omega$ . График зависимости скорости распространения от угла наклона  $0 \leq \varphi \leq 25$  (5.1)

Данная модель позволяет проводить количественный и качественный анализ различных режимов распространения фронтов пожара: переход фронта через разрыв в слое ЛГМ, формирования автомодельного фронта, взаимодействия процессов горения двух параллельных слоев ЛГМ.

#### 4. Модель Гришина

Рассмотрим задачу о распространении одномерного низового пожара. Физически задача ставится следующим образом: известны скорость ветра и температура окружающей среды, геометрические, структурные и реакционные свойства полога леса, температура и размеры очага воспламенения, требуется определить зависимость скорости распространения лесного пожара от угла наклона. Для простоты анализа сделаем следующие допущения: 1. Среда является серой и пятифазной, включающей в себя сухое органическое вещество, воду в жидко-капельном состоянии, коксик, золу и газовую фазу. 2. Газовая фаза состоит из кислорода, горючих компонентов продуктов пиролиза, инертных компонентов воздуха, а также водяного пара и инертных продуктов горения. 3. Градиент температуры поперек полога леса мал по сравнению с градиентом температуры в продольном направлении. Используя математическую формулировку модели Гришина, повернем ось  $ox$  на угол  $\alpha$ .

$$\cos\alpha = \frac{x}{x^1} \rightarrow x = x^1 \cos\alpha$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial(x^1 \cos\alpha)} = \frac{1}{\cos\alpha} \frac{\partial}{\partial x^1}$$

Предположим, что весь фронт движется с одной и той же скоростью,  $\omega$  - это скорость распространения пожара.  $\xi = x^1 - \omega t$  - декартова координата в подвижной системе отсчета, связанной с положением максимального профиля температуры.

$$\frac{d}{d\xi} = -\frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} \quad (4.1)$$

Обозначим  $u_\infty^1 = \frac{u_\infty}{\cos\alpha}$ ;  $D_T^1 = \frac{D_T}{\cos^2\alpha}$ ;  $\lambda_T^1 = \frac{\lambda_T}{\cos^2\alpha}$ .

Уравнение пиролиза:

$$\rho_1 \omega \frac{d\varphi_1}{d\xi} = R_1; R_1 = k_{01} \rho_1 \varphi_1 \exp^{-\frac{E_1}{RT}}; \quad (4.2)$$

Уравнение испарения:

$$\rho_2 \omega \frac{d\varphi_2}{d\xi} = R_2; R_2 = k_{02} \rho_2 \varphi_2 \exp^{-\frac{E_2}{RT}}; \quad (4.3)$$

Уравнение горения твердого вещества:

$$\rho_3 \omega \frac{d\varphi_3}{d\xi} = -\alpha_c R_1 + \frac{M_c}{M_1} R_3; R_3 = k_{03} s_\sigma \rho_5 c_1 \varphi_3 \exp^{-\frac{E_3}{RT}}; \quad (4.4)$$

$$\frac{d\varphi_4}{d\xi} = 0; \quad (4.5)$$

Уравнение диффузий:

$$\frac{d}{d\xi}(\rho_5 D_T^1 \frac{dc_\alpha}{d\xi}) - \rho_5(u^1 - \omega) \frac{dc_\alpha}{d\xi} + R_{5\alpha} - c_\alpha Q = \frac{\alpha}{c_{p\alpha}}(c_\alpha - c_{\alpha\infty}), \alpha = 1, 2, 3 \quad (4.6)$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5; R_{52} = (1 - \alpha_c) v_\Gamma R_1 - R_5; R_{53} = 0;$$

$$R_5 = M_2 k_{05} \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0,25} \left(\frac{c_2 M}{M_2}\right) T^{-2,25} \exp^{-\frac{E_3}{RT}}$$

Уравнение закона сохранения энергии:

$$\frac{d}{d\xi}(\lambda_T^1 \frac{dT}{D\xi}) - [\rho_5(u^1 - \omega) c_{p5} - \omega \sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi}] \frac{dT}{d\xi} - \frac{\alpha}{h}(T - T_\infty) + q_3 R_3 - q_2 R_2 + q_5 R_5 = 0 \quad (4.7)$$

$$u^1 = u_\infty^1$$

$$\rho_5 = \frac{\rho_\infty T_\infty M_\infty^{-1}}{T \sum_{i=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}}; \sum_{i=1}^4 c_\alpha = 1; Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3 \quad (4.8)$$

$$u = u_\infty$$

К системе (4.2)-(4.8) граничные условия:

$$\frac{dc_\alpha}{d\xi} = 0, \frac{dT}{d\xi} = 0; \quad (4.9)$$

$$\xi = -\infty; T = T_\infty, c_\alpha = c_{\alpha\infty}, \varphi_i = \varphi_i; \quad (4.10)$$

$$\xi = +\infty; T = T_\infty, c_\alpha = c_{\alpha\infty}, \varphi_i = \varphi_i; \quad (4.11)$$

Здесь  $t$  - время,  $x$  - декартова координата в системе координат, связанной с серединой первоначального очага пожара (ось  $x$  направлена в сторону невозмущенной скорости ветра, параллельной горизонтальной подстилающей поверхности);  $u$  - компонента скорости в выбранной системе координат;  $\varphi_i, c_\alpha$  - объемные доли фаз и массовые концентрации компонентов соответственно (газовой фазы  $\alpha = 1$  соответствует  $O_2$ ,  $\alpha = 2$  - горючим компонентам продуктов пиролиза,  $\alpha = 3$  - инертным компонентам воздуха,  $\alpha = 4$  - водяному пару и инертным продуктам реакций окисления, пиролиза и горения кокса);  $Q$  - массовая скорость образования газовой фазы;  $R_{5\alpha}$  - массовые скорости образования компонентов газовой фазы;  $R_1, R_2, R_3, R_5$  - массовые скорости реакции пиролиза сухого органического вещества ЛГМ, испарения воды из ЛГМ, горения коксового остатка и газообразных горючих продуктов пиролиза соответственно;  $\rho_i$  - истинная плотность  $i$ - фазы;  $M_\alpha, M_c, M$  - молекулярные массы компонентов газовой фазы, углерода и всей смеси газов соответственно;  $\lambda_T, D_T$  - коэффициенты турбулентной теплопроводности и диффузии соответственно;  $T$  - температура газовой фазы;  $\alpha$  - коэффициент внутреннего теплообмена;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $q_2, q_3$  и  $q_5$  - тепловые эффекты процессов испарения, горения конденсированного горючего и газообразного горючего продукта пиролиза соответственно;  $k_{01}, k_{02}, k_{03}, E_1, E_2, E_3$  - предэкспоненты реакций пиролиза, процессов испарения и горения конденсированного продукта пиролиза (коксыка);  $s_\sigma$  - удельная поверхность конденсированного продукта пиролиза;  $\alpha_c, v_\Gamma$  - коксовое число ЛГМ и доля горючего газа в газообразных продуктах пиролиза соответственно;  $h$  - высота леса;

индексы  $-\infty$  и  $+\infty$  относятся к параметрам невозмущенного потока, параметрам на верхней и нижней границах полого леса.

Из (4.9)-(4.11)  $\rightarrow$

$$\frac{d\varphi_i}{d\xi}\Big|_{\xi=\pm\infty} = 0 \quad (4.12)$$

Для выполнения условий (4.9)-(4.12) при  $T_\infty < T < T_*$  требуется:

$$R_i = 0; R_\alpha = 0; R_5 = 0; \alpha = 1, 2; i = 1, 2, 3$$

Аналитическим решением уравнений (4.2)-(4.8) с граничными условиями (4.9)-(4.11) будет:

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{q} + \sqrt{(\bar{q})^2 - 4e(\Theta_0 - 1)(1 + \pi)}}{2\bar{q}(1 + \pi)} \quad (4.13)$$

Здесь  $T_0$  - максимальная температура во фронте лесного пожара;  $\bar{q}$  - безразмерные значения коэффициентов тепло и массообмена:

$$\bar{q} = [-[\frac{q_3 M_1 \alpha_c}{M_c} + q_5(1 - \alpha_c)v_\Gamma]c_1\varphi_1 + q_2\rho_2\varphi_2](c_5c_{p5}T_\infty)^{-1};$$

$\pi$  - это безразмерная объемная теплоемкость компонентов конденсированной фазы:

$$\pi = \frac{\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi}}{\rho_{5\infty} c_{p5}};$$

$$\theta_0 = \frac{T_0}{T_\infty}, \bar{\omega} = \frac{\omega}{u_\infty}; e = \frac{\alpha \lambda_T^1}{h(c_5 c_{p5} u^1)^2}.$$

## 5. Сравнение двух моделей

Рассмотрим частный случай модели [1], когда  $\alpha_f = 0, H^*(x, y) = H^*, H_0(x, y) = H_0; (x, y) \in D_0, \Phi(x, y) = \Phi; (x, y) \in D_1$ , т.е. движение прямолинейного фронта происходит по однородному слою ЛГМ при отсутствии ветра. Тогда  $\Theta(0, p) = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{p}{\cos\varphi}}^{\infty} \exp(-\rho) \rho d\rho d\varphi$  в статье [1] после аппроксимации

$$\Theta(0, p) = m \exp^{-ap}, m = 1, 2146; q = 0, 9105. \quad (5.1)$$

После подстановки (5.1) в (3.5), получим

$$\frac{H^* - H_0}{\pi a_0 p_0^2 \delta \Phi (1 + \frac{\delta}{3h_f})} = \frac{1 - \exp^{-\frac{qv}{\Gamma p_0}}}{p_0 k + qv} \quad (5.2)$$

Уравнение (5.2) имеет только одно устойчивое решение:

$$v = \frac{\pi a_0 p_0^3 m \delta \Phi (1 + \frac{\delta}{3h_f})}{q(H^* - H_0)}. \quad (5.3)$$

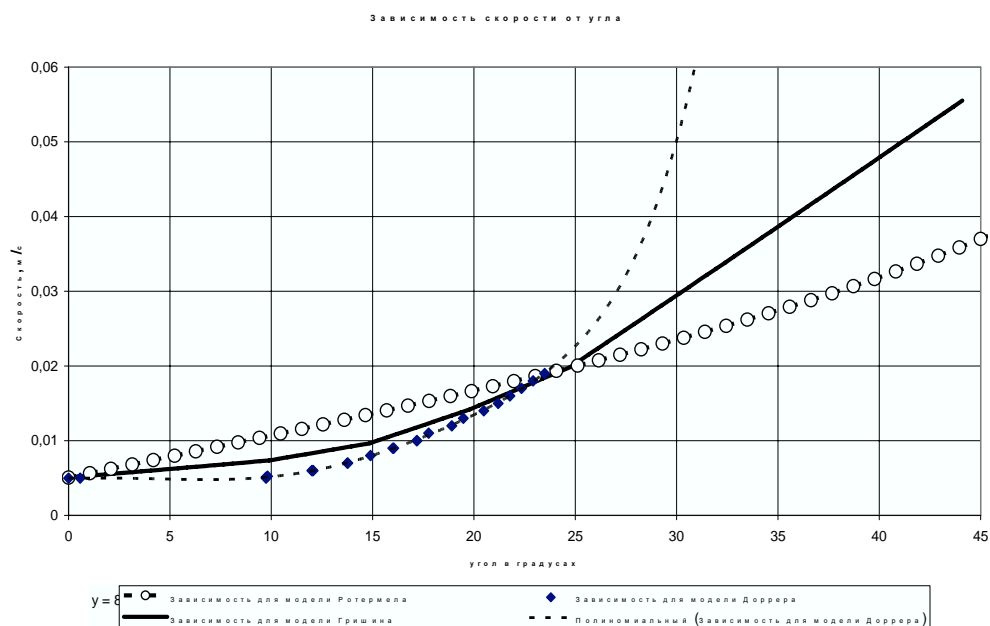
Перепишем формулу (2.1) в обозначениях принятых Доррером:

$$v = \frac{\xi_0 \delta \Phi}{H^* - H_0} \quad (5.4)$$

где  $\xi_0$  - коэффициент, определяющий долю теплового потока, идущую на распространение горения. Этот коэффициент определяется параметрами ЛГМ. Сравнивая (5.3) и (5.4), получим соотношение

$$\frac{\pi a_0 p_0^3 m (1 + \frac{\delta}{3h_f})}{q} = \xi_0,$$

которое связывает параметры функции влияния  $\xi_v(x, y, z)$  с коэффициентом  $\xi_0$  из модели [2] и позволяет определять эти параметры на основе данных о ЛГМ. Зависимость скорости распространения пожара для трех моделей приведены на (5.1)



Р и с у н о к 5.1

Зависимость скорости распространения от угла наклона для рассматриваемых моделей

## 6. Заключение

На настоящий момент эмпирические и полуэмпирические модели широко используются на практике. Вебер [4] замечает, что на многие ключевые вопросы о пожаре не могут быть найдены ответы в рамках таких моделей, так как они часто характерны именно для тех экспериментальных условий, в которых они были разработаны. Становится понятным, что требуется разработка строгих физических моделей лесных пожаров "нового поколения". В данной работе было показано, что сравнение моделей Доррера и Ротермела, Гришина позволяют определить область значений параметров математической модели для исследования зависимости скорости распространения от угла наклона. При использовании эмпирических данных модели Ротермела в модели Доррера была определена зависимость скорости распространения от угла наклона и показано, что модель Ротермела при углах наклона до 23 градусов дает завышенные значения скорости распространения пожара, а модель Доррера дает значения близкие к модели Гришина, однако при углах наклона более 23 градуса модель Доррера имеет ограничения, модель Роттермела дает заниженные значения скорости распространения пожара в то время как даже упрощенная модель Гришина при этом не имеет ограничений.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доррер, Г. А. Модель распространения фронта лесного пожара / Г. А. Доррер // Теплофизика лесных пожаров. - Новосибирск : ИТФ СО АН СССР, 1984. - С. 86-99.
2. Р. Ротермел. Математическое моделирование при прогнозировании распространения лесного пожара на незаселенных территориях, 1972.
3. А.М. Гришин. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Наука, Новосибирск, 1992. Model: Grishin. А.М.
4. Р. Вебер. Моделирование распространения пожара на подстилающей поверхности. Наука, 17:6782, 1991.
5. Лесные пожары в Австралии - <http://ru.wikipedia.org/wiki/>
6. Ф. Альбини. Оценка и эффекты поведения пожара на незаселенной территории, 1976
7. Гришин. Математические модели лесных пожаров. Изд-во ТГУ, Томск, 1981. Model: Grishin.

*Дата поступления 20.08.2009*

# Researches mathematical models distribution of a fire for definition dependence speed of distribution from a corner of an inclination

© L. U. Kataeva<sup>3</sup>, I. E. Belotserkovskaya<sup>4</sup>

**Abstract.** The article deals with slope angle influence on fire spread rate. The research is based on Grishin's fire spread model [3]. Modeling results are compared with known values from Dorrer's [1], Rothermel's [2] models and slope fire modeling experiments. The slope fire spread dependence is estimated.

**Key Words:** forest fire, wildland forest fire modeling.

## REFERENCES

1. Dorrer G. Heading fire spread model. // Forest fire thermal physics-Novosibirsk, 1984. - p. 86-99.
2. R.C. Rothermel. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. Intermountain Forest. Range Experiment Station, Forest Service, US Dept. of Agriculture, 1972.
3. A. Grishin A Mathematical fire spread modeling and new fire fighting approaches. Science, Novosibirsk, 1992. Model: Grishin. A.M.
4. R.O.Weber. Modelling re spread through fuel beds. Progress in Energy and Combustion Science, 17:6782, 1991.
5. Bushfires in Victoria, Australia -<http://ru.wikipedia.org/wiki/>
6. Frank A. Albini. Estimating wildfire behavior and effects, 1976
7. A. Grishin. Mathematical fire spread modeling. Tomsk, 1981. Model: Grishin.

---

<sup>3</sup>Associate professor of Applied Mathematics Chair, Nizhni Novgorod State Technical University after R.E. Alekseeva, Nizhniy Novgorod; miran\_kaspir@mail.ru.

<sup>4</sup>Assistant of Applied Mathematics Chair, Nizhni Novgorod State Technical University after R.E. Alekseeva, Nizhniy Novgorod; miran\_kaspir@mail.ru.