

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛЯН НА ПУТИ ОГНЯ

Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук

Белорусский государственный университет,
Беларусь, Минск, BarovikD@gmail.com, Taranchuk@bsu.by

Аннотация. Рассмотрена задача компьютерного моделирования распространения низовых лесных пожаров в двумерной постановке. Приведена формулировка начально-краевой задачи в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Представлены результаты вычислительных экспериментов по изучению динамики зоны горения вблизи полян во фронте, тыле и флангах пожара. Выявлены и показаны качественные отличия геометрии и динамики распределений плотностей температурного фронта при различных скоростях ветра в пологе леса.

Ключевые слова: низовой лесной пожар, физико-химические процессы горения, компьютерная модель, численные методы, уравнения теплопереноса, карта плотности температуры.

MODELING OF GROUND FOREST FIRES SPREAD PROCESSES IN CASE OF FUELBREAKS PRESENCE

D.V. Barovik, V.B. Taranchuk

Belarusian State University,
Belarus, Minsk, BarovikD@gmail.com, Taranchuk@bsu.by

Abstract. The problem of computer modeling of two-dimensional ground forest fire spread is considered. We describe the initial-boundary value problem in a form of a system of partial differential equations. We provide the results of numerical experiments showing how fire front spreads in different directions and its behavior near fuelbreaks. Qualitative differences in the geometry and dynamics of temperature density maps are shown for a several wind speeds.

Keywords: ground forest fire, physical and chemical processes of combustion, computer model, numerical methods, heat and mass transfer equations, temperature density map.

Создание компьютерных моделей лесных пожаров важно для использования подразделениями по устранению чрезвычайных ситуаций, оптимизации их действий, минимизации потерь, оценке предлагаемых решений по профилактическим мерам. Особую важность представляют прогнозы возможного развития пожаров вблизи объектов энергетики. С обзором компьютерных моделей лесных пожаров можно ознакомиться по публикации [1]. Предлагается модификация программного комплекса [2] для подготовки типовых сценариев возможного развития пожаров вблизи строящейся Белорусской АЭС. Ниже изложены дополнения модели, теоретические основы математического описания, примеры качественных оценок динамики процессов для типовых представительных конфигураций лесных массивов.

В приведенной ниже математической модели распространения лесных пожаров вычисляется эволюция распределений следующих величин: T – осредненная по высоте слоя лесного горючего материала (ЛГМ) температура в Кельвинах; φ_j , $j=1, 2, 3, 4$ – объемные доли многофазной реагирующей среды, где φ_1 соответствует сухому органическому веществу лесных горючих материалов, φ_2 – связанной в горючем материале в жидко-капельном состоянии воде, φ_3 – коксика (конденсированному продукту пиролиза), φ_4 – минеральной части ЛГМ (золе); c_v , $v=1, 2, 3$ – массовые концентрации компонентов газовой фазы, где c_1 соответствует кислороду, c_2 – горючим газам (горючим компонентам продуктов пиролиза), c_3 – смеси остальных газов (инертных компонентов воздуха, водяного пара, инертных продуктов реакций пиролиза, горения коксика и окисления горючих газов).

При построении модели учитываются следующие физико-химические процессы: «подвод» теплоты в результате конвекции, теплопроводности и излучения, прогрев ЛГМ, их сушка и пиролиз, горение газообразных и твердых продуктов пиролиза.

Вывод уравнений, обоснование модели, численная схема и особенности организации расчетов приведены в публикациях [3 - 5].

Относительно неизвестных функций φ_j ($j=1, 2, 3, 4$), c_ν ($\nu=1, 2, 3$), T , зависящих от времени и пространственных координат, формулируется начально-краевая задача (1 - 16):

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T), \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + (V, \text{grad}c_1) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad}c_1) = \Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + (V, \text{grad}c_2) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad}c_2) = \Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_5 c_{p5} (V, \text{grad}T) - \text{div}(\lambda_T \text{grad}T)}{\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{pj}} = \Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T). \quad (4)$$

Определяющие функции, входящие в записанные уравнения:

$$\Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T) = -\frac{R_1}{\rho_1}, \quad \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T) = -\frac{R_2}{\rho_2}, \quad \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{\alpha_c R_1}{\rho_3} - \frac{M_c R_3}{M_1 \rho_3}, \quad (5)$$

$$\Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{1}{\rho_5} \left(R_{51} - c_1 Q - \frac{\alpha}{c_{p5} \Delta h} (c_1 - c_{1\infty}) \right), \quad (6)$$

$$\Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{1}{\rho_5} \left(R_{52} - c_2 Q - \frac{\alpha}{c_{p5} \Delta h} (c_2 - c_{2\infty}) \right), \quad (7)$$

$$\Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{-q_2 R_2 + q_3 R_3 + q_5 R_5 - \frac{\alpha}{\Delta h} (T - T_\infty) - 4\kappa_R \sigma T^4}{\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{pj}}, \quad (8)$$

$$\sum_{\nu=1}^3 c_\nu = 1, \quad \rho_5 = \frac{\rho_\infty T_\infty}{M_\infty T} \left(\sum_{\nu=1}^3 \frac{c_\nu}{M_\nu} \right)^{-1}, \quad Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad (9)$$

$$R_1 = k_{01} \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_2 = k_{02} T^{-1/2} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad R_3 = k_{03} s_\sigma \varphi_3 \rho_3 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right), \quad (10)$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2}, \quad R_{52} = (1 - \alpha_c) \nu_T R_1 - R_5, \quad R_5 = \rho_5 \min\left(c_2, \frac{M_2}{2M_1} c_2\right) k_{CO} \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right). \quad (11)$$

Здесь t – время; V – вектор равновесной скорости ветра; T_∞ – невозмущенная температура окружающей среды в Кельвинах; ρ_j , $j=1, 2, 3, 4$ – истинные плотности j -й фазы; ρ_5 – плотность газовой фазы (смеси газов); ρ_∞ – невозмущенная плотность смеси газов (плотность воздуха); $c_{1\infty}$ и $c_{2\infty}$ – массовые концентрации кислорода и горючих газов в невозмущенной атмосфере; M_ν , $\nu=1, 2, 3$ – молекулярные массы компонентов газовой фазы; M_c – молекулярная масса углерода, M_∞ – молекулярная масса (невозмущенная) воздуха; c_{pj} , $j=1, 2, 3, 4$ – теплоемкости j -й фазы; c_{p5} – теплоемкость газовой фазы; Q – массовая скорость образования газовой фазы; λ_T – коэффициент турбулентной теплопроводности; D_T – коэффициент диффузии; q_2 , q_3 и q_5 – тепловые эффекты процессов испарения, горения конденсированного горючего и газообразного горючего продукта пиролиза соответственно; Δh – высота слоя ЛГМ; α – коэффициент теплообмена, между окружающим воздухом и моделируемым слоем ЛГМ; κ_R – интегральный коэффициент поглощения; σ – постоянная Стефана-Больцмана; R_1 – массовая скорость реакции пиролиза

(разложения под действием высокой температуры с выделением горючих газов) сухого органического вещества ЛГМ; R_2 – массовая скорость испарения воды из ЛГМ (сушки ЛГМ); R_3 – массовая скорость реакции горения коксового остатка; R_{51}, R_{52} – массовые скорости образования кислорода, горючих газов; R_5 – массовая скорость реакции горения (окисления) горючих газов; k_{01}, k_{02}, k_{03} – предэкспоненты химических реакций, E_1, E_2, E_3 – энергии активации химических реакций, R – универсальная газовая постоянная, s_σ – удельная поверхность конденсированного продукта пиролиза (кокшика), α_c – коксовое число ЛГМ, ν_r – доля газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ.

Система (1) - (4) – нелинейная система уравнений в частных производных, она включает теплофизические коэффициенты, скорости сушки и реакций пиролиза и горения, целый ряд других эмпирических постоянных. Совокупность коэффициентов уравнений представляет оснастку принятой математической модели, является ее существенной и неотъемлемой частью. Наполнение модели осуществлялось с учётом приведенных в литературных источниках сведений, причём предпочтение отдавалось тем, где упоминались экспериментальные исследования или отмечалось, что они получены с помощью решения обратных задач механики реагирующих сред [1, 3].

О начальных и граничных условиях. Начальные распределения объёмных долей, массовых концентраций и температуры задаются во всей области определения решения. Обозначим область моделирования через G , а ее границу – Γ . Область G можно разбить на три подобласти $G = G_{\text{fire}} \cup G_- \cup G_+$. Эти подобласти не обязательно односвязные, их взаимная геометрия может быть довольно сложной, например, для многоочаговых пожаров. Через G_- и G_+ обозначим подобласти сгоревших и не затронутых пожаром участков области G удаленные от очагов горения на достаточное расстояние (эти подобласти характеризуются невозмущенными значениями $c_{1\infty}, c_{2\infty}$ и T_∞). В зоне горения G_{fire} начальные распределения величин φ_j ($j=1, 2, 3, 4$), c_ν ($\nu=1, 2, 3$) и T должны быть «самосогласованными», так как между всеми этими величинами есть определённые связи физического характера, которые необходимо учитывать. Это довольно сложные вопросы, требующие отдельного рассмотрения [4]. Начальные распределения в зонах «выжженная» G_- и «невыжженная» G_+ задаются следующим образом:

$$T|_{t=0}(G_- \cup G_+) = T_\infty; \quad (12)$$

$$c_1|_{t=0}(G_- \cup G_+) = c_{1\infty}, \quad c_2|_{t=0}(G_- \cup G_+) = c_{2\infty}, \quad c_3|_{t=0}(G_- \cup G_+) = 1 - c_{1\infty} - c_{2\infty}, \quad (13)$$

$$\varphi_1|_{t=0}(G_+) = \frac{\rho_0}{\rho_1}, \quad \varphi_2|_{t=0}(G_+) = (1 - \zeta)W \frac{\rho_0}{\rho_2}, \quad \varphi_3|_{t=0}(G_+) = 0, \quad \varphi_4 \equiv 0, \quad (14)$$

$$\varphi_1|_{t=0}(G_-) = 0, \quad \varphi_2|_{t=0}(G_-) = 0, \quad \varphi_3|_{t=0}(G_-) = \alpha_c(\rho_0/\rho_3). \quad (15)$$

Здесь предполагается, что в G_- ЛГМ полностью сгорели; ρ_0 – плотность типичного слоя ЛГМ, плотности ρ_j ($j=1, 2, 3, 4$), W – влагосодержание слоя ЛГМ и ζ – зольность лесных горючих могут быть неоднородными, соответствующие распределения в рассматриваемой области моделирования считаются заданными функциями координат.

На границе Γ области моделирования G задаются мягкие граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_\Gamma = 0, \quad \left. \frac{\partial c_1}{\partial n} \right|_\Gamma = 0, \quad \left. \frac{\partial c_2}{\partial n} \right|_\Gamma = 0. \quad (16)$$

Описанная выше система дифференциальных уравнений решались численно с использованием системы Wolfram Mathematica. Применялись авторские явные численные схемы с равномерной сеткой по пространству и переменным временным шагом по времени. Временные шаги выбирались из условий устойчивости численной схемы с учетом специфики и скоростей протекания физико-химических процессов на каждом конкретном шаге по времени.

Результаты моделирования при наличии лесопожарных разрывов. Рассмотрим модельную задачу, когда геометрия – квадратная область лесного массива. Изучается процесс распространения пожара в ситуации, когда в центре области (в начале координат) «возникает» очаг горения (см. рис. 1). Для простоты описания считается, что направление ветра в пологом леса направлено по оси Ox (слева-направо на приведенных графиках). При этом по направлению ветра, против ветра и перпендикулярно (на одном из флангов) имеются участки с отсутствием горючей растительности (поляны).

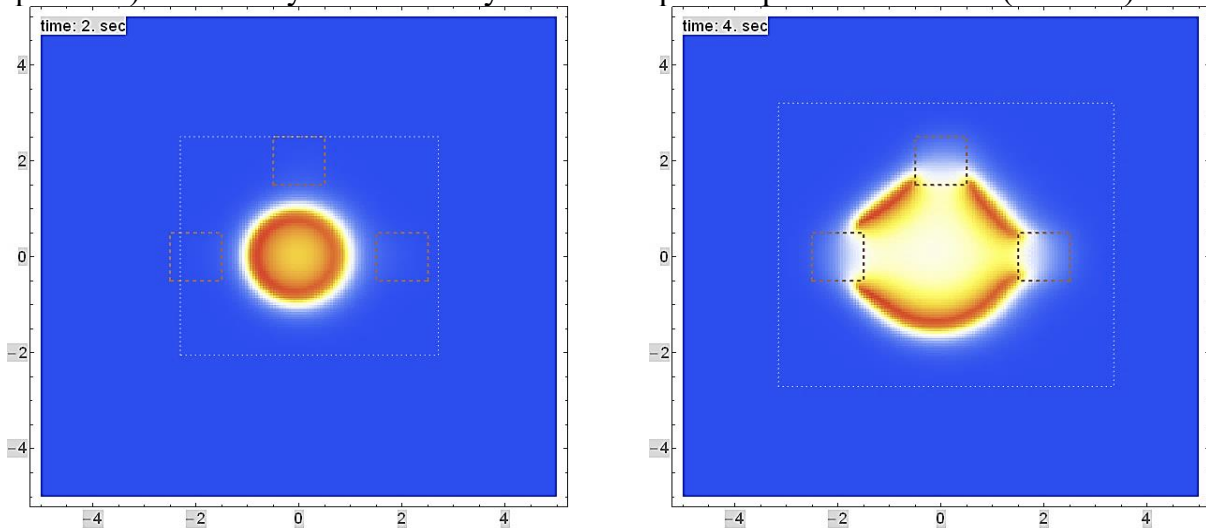


Рис. 1. Геометрия очага пожара и расположение полян на начальном этапе распространения пожара

При моделировании использованы следующие значения определяющих величин задачи: $W=10\%$, $\rho_0=5\text{кг/м}^3$, $\Delta h=0.1\text{м}$, $T_\infty=300\text{К}$, $\rho_1=500\text{кг/м}^3$, $\rho_2=1000\text{кг/м}^3$, $\rho_3=200\text{кг/м}^3$, $\rho_4=200\text{кг/м}^3$, $\rho_\infty=1.15\text{кг/м}^3$, $c_{1\infty}=0.23$, $c_{2\infty}=0$, $M_1=32$, $M_2=28$, $M_3=29$, $M_C=12$, $M_\infty=29$, $c_{p1}=2000\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $c_{p2}=4180\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $c_{p3}=900\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $c_{p4}=1000\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $c_{p5}=1000\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $q_2=3\cdot 10^6\text{Дж/кг}$, $q_3=1.2\cdot 10^7\text{Дж/кг}$, $q_5=10^7\text{Дж/кг}$, $\lambda_T=1000\text{Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{К)}$, $D_T=1.5\text{м}^2/\text{с}$, $\alpha=100\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $\alpha_c=0.1$, $\nu_T=0.8$, $\kappa_R=1.5\text{м}^{-1}$, $s_\sigma=1000\text{м}^{-1}$, $E_1/R=9400\text{К}$, $E_2/R=6000\text{К}$, $E_3/R=10000\text{К}$, $k_{01}=3.63\cdot 10^4\text{с}^{-1}$, $k_{02}=6\cdot 10^5\text{К}^{0.5}\text{с}^{-1}$, $k_{03}=1000\cdot\text{с}^{-1}$.

На рис. 2 - 4 приведены карты распределения температуры в два момента времени: в процессе «огибания» полян, когда фронты разомкнулись, и после прохождения фронтом полян. Приведены результаты трех вариантов моделирования, отличающихся только величиной равновесной скорости ветра на середине высоты пламени, а именно для значений $V=1$; 1.5 ; 2м/с соответственно.

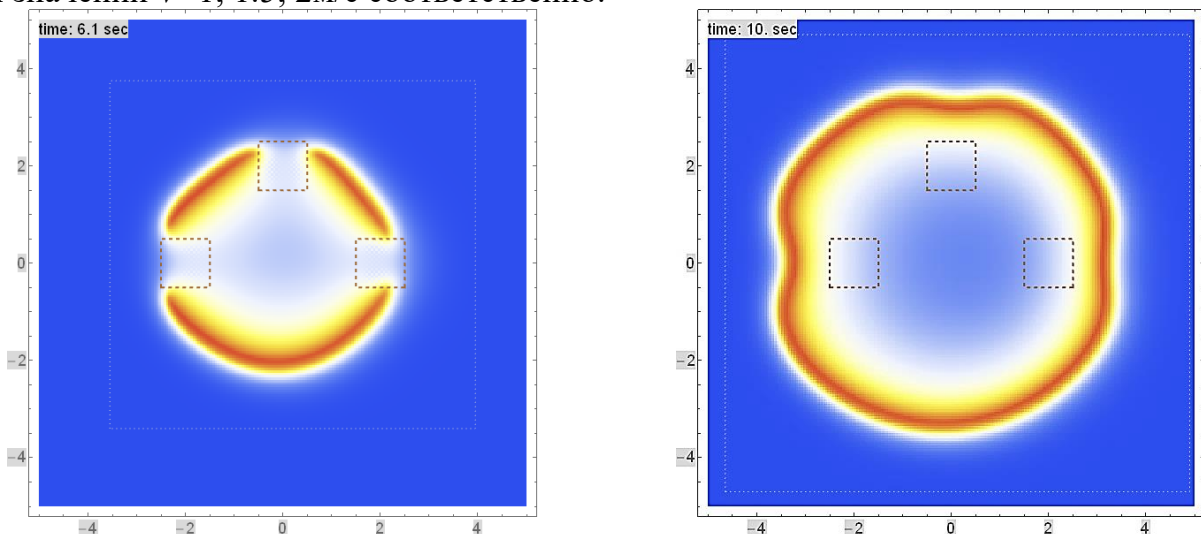


Рис. 2. Ветер 1 м/с. Огибание фронтом пожара трех полян

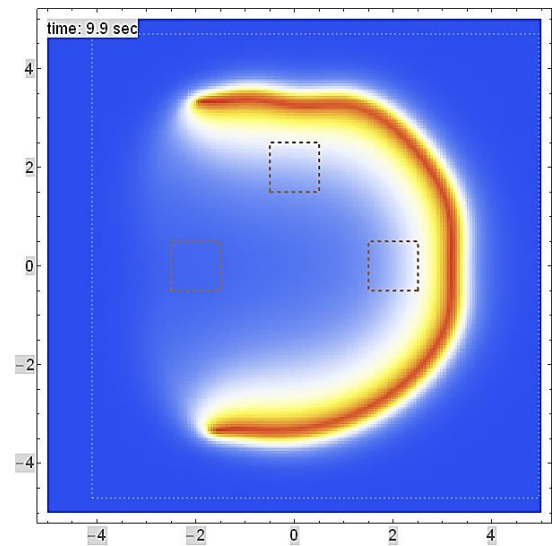
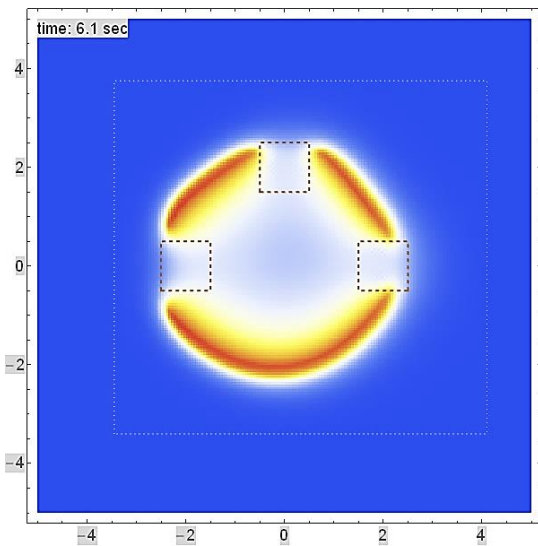


Рис. 3. Ветер 1.5 м/с. Прекращение распространения пожара «против» ветра после разрыва фронта поляной

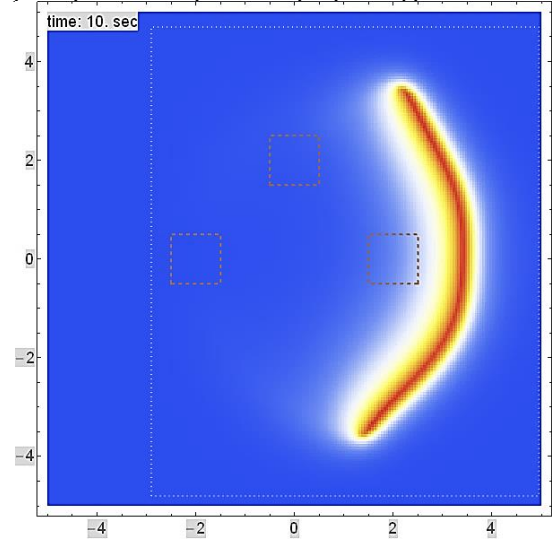
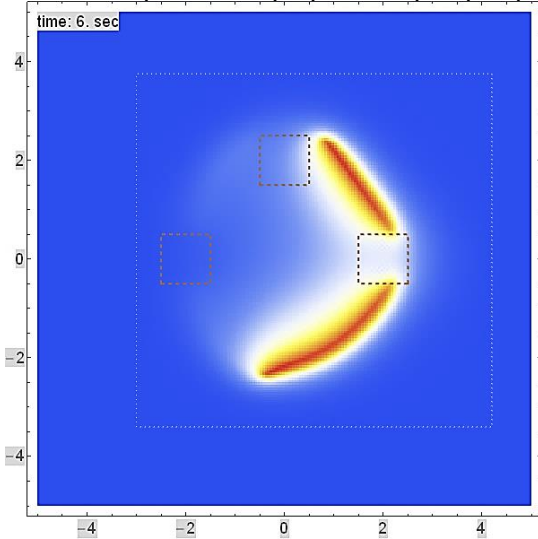


Рис. 4. Ветер 2 м/с. Фронт пожара распространяется только по направлению ветра

Очаг пожара распространяется эллипсом, достигает полян и начинает огибать их. Результаты показывают, что качественно возможны три варианта дальнейшего развития процесса: смыкание фронта пожара за поляной независимо от направления ветра (рис. 2); при увеличении скорости ветра смыкание фронта против ветра не происходит (рис. 3); при достаточно сильном ветре встреча препятствия на пути фронта приводит к его остановке во всех направлениях кроме направления ветра.

Библиографический список

1. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Состояние проблемы и результаты компьютерного прогнозирования распространения лесных пожаров // Вестник БГУ. Серия 1 Физика, Математика, Информатика. 2011. №3. С.78-84.
2. Баровик Д.В., Корзюк В.И., Таранчук В.Б. Методические и алгоритмические основы программного комплекса "Расчет и визуализация динамики лесного пожара" // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. №2(30). 2011. С.22-33.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
4. Баровик Д.В., Корзюк В.И., Таранчук В.Б. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров // Труды института математики. 2013. Т.21. №1. С3-15.
5. Barovik D.V., Taranchuk V.B. Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires // Mathematical Modelling and Analysis. 2010. Vol.15. №2. P.161-174.