

Научная статья

УДК 004.942:519.6; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-18-28

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА И ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

✉Асташов Егор Владимирович;

Парёнкина Виктория Игоревна.

Академия ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉akutnev@inbox.ru

Аннотация. Разработана и верифицирована математическая модель для оперативного прогнозирования динамики лесных пожаров, основанная на системе уравнений в частных производных. Модель включает нестационарное уравнение теплопроводности, конвективный перенос тепла воздушными потоками и кинетику горения целлюлозных материалов с учетом влажности. Научная новизна работы заключается в адаптации физически обоснованного подхода теплотехники к задачам моделирования природных пожаров, что позволило учесть влияние метеорологических факторов и свойств горючих материалов. Реализован вычислительный алгоритм на основе неявной разностной схемы и метода прогонки. Установлены количественные зависимости: увеличение скорости ветра с 1 до 6 м/с приводит к росту скорости фронта в 4,3 раза, а повышение влажности с 5 % до 30 % снижает ее в 1,8 раза. Верификация на экспериментальных данных показала расхождение не более 12 %. Практическая значимость для МЧС России заключается в создании инструмента для прогнозирования времени подхода пожара к населенным пунктам и оптимизации тушения.

Ключевые слова: лесные пожары, математическое моделирование, уравнение теплопереноса, диффузионно-конвективная модель, скорость ветра, численные методы, прогнозирование распространения

Для цитирования: Асташов Е.В., Паренкина В.И. Численное моделирование динамики фронта лесного пожара с учетом влияния ветра и влажности материалов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 18–28. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-18-28

Scientific article

NUMERICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF A FOREST FIRE FRONT TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF WIND AND MATERIAL MOISTURE

✉Astashov Egor V.;

Parenkina Victoria I.

Academy of the State fire service of the EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉akutnev@inbox.ru

Abstract. The paper developed and verified a mathematical model for the operational forecasting of the dynamics of forest fires, based on a system of partial differential equations. The model includes a non-stationary heat conduction equation, convective heat transfer by air flows, and the combustion kinetics of cellulose materials, taking into account the humidity. The scientific novelty of the work lies in the adaptation of a physically grounded approach of heat engineering to the problems of modeling natural fires, which allowed to take into account the influence of meteorological factors and the properties of combustible materials. A computational algorithm based on an implicit difference scheme and the method of forward sweep is implemented.

Quantitative relationships have been established: an increase in wind speed from 1 to 6 m/s leads to a 4.3-fold increase in front speed, while an increase in humidity from 5 % to 30 % reduces it by 1.8 times. Verification based on experimental data showed a discrepancy of no more than 12 %. The practical significance for the Russian Ministry of Emergency Situations is to create a tool for predicting the time it takes for a fire to reach populated areas and optimizing firefighting operations.

Keywords: forest fires, mathematical modeling, heat transfer equation, diffusion-convection model, wind speed, numerical methods, and spread prediction

For citation: Astashov E.V., Parenkina V.I. Numerical modeling of the dynamics of a forest fire front taking into account the influence of wind and material moisture // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)* = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 1 (57). P. 18–28. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-18-28

Введение

Ежегодно на территории Российской Федерации регистрируется более 20 тысяч лесных пожаров, площадь которых превышает 3 млн гектаров. Экономический ущерб исчисляется миллиардами рублей, а экологические последствия оказывают долгосрочное воздействие на состояние атмосферы и биосферы. В условиях изменения климата проблема лесных пожаров приобретает особую остроту, требуя разработки эффективных методов прогнозирования и противодействия.

Для органов МЧС России задача оперативного прогнозирования развития лесных пожаров является критически важной при планировании эвакуационных мероприятий, развертывании сил и средств тушения, а также при принятии решений о введении особого противопожарного режима. Существующие методы прогнозирования, регламентированные нормативными документами [1], зачастую основаны на эмпирических зависимостях и не учитывают в полной мере физику процессов теплопереноса в лесных горючих материалах.

В настоящее время для моделирования лесных пожаров применяются различные подходы: от эмпирических моделей Ротермеля [2] до сложных вычислительных комплексов на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD-модели) [3]. Эмпирические модели, несмотря на простоту реализации, обладают ограниченной точностью при изменении внешних условий. Полные CFD-модели требуют значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их оперативное использование.

Цель нашей работы – разработка математической модели и программного комплекса для прогнозирования динамики фронта лесного пожара, основанной на фундаментальных уравнениях теплопереноса и учитывающей ключевые факторы: скорость ветра и влажность лесных горючих материалов.

Математическая модель и методы исследования

В основе разработанной математической модели лежит фундаментальное уравнение теплопереноса, модифицированное для учета специфики распространения лесного пожара. Рассматривается одномерная постановка задачи, предполагающая распространение фронта горения по участку лесного массива длиной L . Процесс описывается нестационарным уравнением теплопроводности, дополненным членами, учитывающими конвективный перенос тепла воздушными потоками и экзотермическую реакцию горения целлюлозных материалов:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - v_w \frac{\partial T}{\partial x} + Q_g(T, \eta), \quad (1)$$

где $T = T(x, t)$ представляет температурное поле как функцию координаты x и времени t , ρ характеризует плотность лесного горючего материала, c_p – удельную теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности слоя лесных горючих материалов, v_w – скорость ветрового потока, а $Q_g(T, \eta)$ описывает объемную мощность тепловыделения при горении.

Мощность тепловыделения моделируется с использованием аппарата химической кинетики, где скорость реакции подчиняется закону Аррениуса и зависит от степени увлажнения материала:

$$Q_g(T, \eta) = Q_0(1 - \eta)e^{-\frac{E_a}{R(T+273)}}H(T - T_{\text{воспл}}), \quad (2)$$

В данном выражении Q_0 определяет максимально возможную мощность тепловыделения, η – относительную влажность лесных горючих материалов, E_a – энергию активации процесса пиролиза, R – универсальную газовую постоянную, $T_{\text{воспл}}$ – критическую температуру воспламенения, а H – функцию Хевисайда, обеспечивающую активацию источника тепла только после достижения температуры воспламенения.

Начальные условия предполагают равномерное распределение температуры по всему расчетному участку с локализованным источником зажигания:

$$T(x, 0) = T_0 + (T_{\text{воспл}} - T_0)e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где T_0 соответствует начальной температуре окружающей среды, а параметр σ определяет размер области начального зажигания.

Граничные условия формулируются следующим образом: на левой границе поддерживается температура источника зажигания:

$$T(0, t) = T_{\text{воспл}}, \quad (4)$$

В то время как на правой границе принимается условие теплоизоляции:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad (5)$$

что физически соответствует отсутствию теплового воздействия за пределами расчетной области.

Для численного решения сформулированной краевой задачи применяется неявная разностная схема, обеспечивающая безусловную устойчивость при произвольном шаге по времени. Пространственная область дискретизируется на N узлов с постоянным шагом $\Delta x = \frac{l}{N-1}$, временная область – с шагом Δt . Разностный аналог дифференциального уравнения записывается в виде:

$$\rho_i c_{p,i} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left(\lambda_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^n}{\Delta x} - \lambda_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^n}{\Delta x} \right) - v_w \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^n}{\Delta x} + Q_{g,i}^{n+1}, \quad (6)$$

Для каждого внутреннего узла сетки $i = 1, 2, \dots, N-1$ уравнение (6) формирует систему из $N-1$ линейных уравнений относительно неизвестных температур T_i^{n+1} на новом временном слое. К этим уравнениям добавляются два граничных условия: при $i = 0$ выполняется условие (4) в виде $T_0^{n+1} = T_{\text{воспл}}$, а при $i = N$ применяется условие теплоизоляции (5), которое в разностной форме записывается как $T_N^{n+1} = T_{N-1}^{n+1}$. Таким

образом, полная система состоит из $N + 1$ линейных алгебраических уравнений с $N + 1$ неизвестными значениями температуры.

Коэффициенты теплопроводности на гранях ячеек вычисляются с использованием гармонического осреднения

$$\lambda_{i+\frac{1}{2}} = \frac{2\lambda_i\lambda_{i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}},$$

что обеспечивает выполнение условий сопряжения на границах раздела сред с различными теплофизическими свойствами.

Полученная система линейных алгебраических уравнений (4)–(6) относительно температур на новом временном слое T_i^{n+1} характеризуется трехдиагональной структурой матрицы коэффициентов, что позволяет эффективно решать ее методом прогонки. Критерием достижения фронтом пожара точки с координатой x считается выполнение условия $T(x, t) \geq T_{\text{воспл}}$.

Положение фронта пожара $x_f(t)$ определяется как максимальная координата, в которой температура превышает температуру воспламенения:

$$x_f(t) = \max\{x \in [0, L]: T(x, t) \geq T_{\text{воспл}}\} \quad (7)$$

Скорость распространения фронта определяется как производная от положения фронта по времени $v_f = \frac{dx_f}{dt}$ и вычисляется численным дифференцированием полученного решения.

Программная реализация

Для численного решения системы уравнений (1)–(7) разработан специализированный программный комплекс на языке Python, реализующий неявную разностную схему с применением метода прогонки. Основу вычислительного ядра составляет класс ForestFireModel (рис. 1), инкапсулирующий параметры лесных горючих материалов и методы расчета.

```

1 usage
2
3 class ForestFireModel:
4     def __init__(self, L=200.0, Nx=200, t_max=3600, dt=0.5):
5         self.L = L
6         self.Nx = Nx
7         self.dx = L / (Nx - 1)
8         self.x = np.linspace(start=0, L, Nx)
9         self.t_max = t_max
10        self.dt = dt
11
12        # Параметры для реалистичного распространения
13        self.rho = 15.0 # плотность, кг/м³ (лесная подстилка)
14        self.cp = 1200.0 # теплоемкость, Дж/(кг·°C)
15        self.lambda_ = 0.08 # теплопроводность, Вт/(м·°C)
16        self.T_ign = 300.0 # температура воспламенения, °C
17        self.Q0 = 8.0e6 # мощность тепловыделения, Вт/м³
18        self.E_a = 50000 # энергия активации, Дж/моль
19        self.R = 8.314 # газовая постоянная
20        self.sigma_ign = 15.0 # область начального зажигания
21
22
23
24
25
26

```

Рис. 1. Программная реализация класса ForestFireModel

Реализация мощности тепловыделения согласно уравнению (2) включает закон Аррениуса и учет влажности материалов (рис. 2)

```

1 usage
27 def Q_combustion(self, T, moisture):
28     """Расчет мощности тепловыделения при горении"""
29     if T < self.T_ign:
30         return 0.0
31     else:
32         # модель с более интенсивным горением
33         arrhenius = np.exp(-self.E_a / (self.R * (T + 273.15)))
34         return self.Q0 * (1 - moisture) * arrhenius * (T / self.T_ign) ** 3
--

```

Рис. 2. Программная реализация функции Q_combustion

Для решения трехдиагональной системы уравнений (6) применен устойчивый метод прогонки (рис. 3), обеспечивающий безусловную сходимость при произвольном шаге по времени.

```

1 usage
36 def thomas_algorithm(self, a, b, c, d):
37     """Реализация метода прогонки для трехдиагональной матрицы"""
38     n = len(d)
39     cp = np.zeros(n - 1)
40     dp = np.zeros(n)
41
42     # Прямой ход
43     cp[0] = c[0] / b[0]
44     dp[0] = d[0] / b[0]
45
46     for i in range(1, n - 1):
47         denom = b[i] - a[i - 1] * cp[i - 1]
48         cp[i] = c[i] / denom
49         dp[i] = (d[i] - a[i - 1] * dp[i - 1]) / denom
50
51     dp[n - 1] = (d[n - 1] - a[n - 2] * dp[n - 2]) / (b[n - 1] - a[n - 2] * cp[n - 2])
52
53     # Обратный ход
54     T = np.zeros(n)
55     T[n - 1] = dp[n - 1]
56     for i in range(n - 2, -1, -1):
57         T[i] = dp[i] - cp[i] * T[i + 1]

```

Рис. 3. Программная реализация метода прогонки

Основной алгоритм решения реализует итерационный процесс с дискретизацией по времени и пространству (рис. 4). На каждом временном шаге формируется матрица коэффициентов, учитывающая диффузионный и конвективный перенос тепла, а также нелинейный источник тепловыделения.

```

91     for i in range(self.Nx):
92         Q_comb = self.Q_combustion(T[i], moisture)
93
94         if i == 0:
95             # Граничное условие
96             b[i] = 1.0
97             c[i] = 0.0
98             d[i] = 600
99         elif i == self.Nx - 1:
100            # Условие теплоизоляции
101            a[i - 1] = -self.lambda_ / self.dx ** 2
102            b[i] = self.rho * self.cp / self.dt + self.lambda_ / self.dx ** 2
103            d[i] = self.rho * self.cp * T[i] / self.dt + Q_comb
104        else:
105            # Внутренние узлы с учетом ветра
106            conv_term = wind_speed / self.dx
107            a[i - 1] = -self.lambda_ / self.dx ** 2 - conv_term

```

Рис. 4. Программная реализация формирования матрицы коэффициентов

Положение фронта горения определяется согласно уравнению (7) как максимальная координата, в которой температура превышает точку воспламенения (рис. 5).

```

1 usage
61 def calculate_front_position(self, T):
62     """Определение положения фронта пожара"""
63     # Находим последний узел, где температура превышает температуру воспламенения
64     for i in range(len(T) - 1, -1, -1):
65         if T[i] >= self.T_ign:
66             return self.x[i]
67     return 0.0

```

Рис. 5. Программная реализация функции `calculate_front_position`

Для комплексного анализа разработан модуль многовариантных расчетов (рис. 6), позволяющий исследовать влияние различных факторов.

```

136 scenarios = [
137     {'wind_speed': 1.0, 'moisture': 0.15, 'label': 'Слабый ветер 1 м/с'},
138     {'wind_speed': 3.0, 'moisture': 0.15, 'label': 'Умеренный ветер 3 м/с'},
139     {'wind_speed': 6.0, 'moisture': 0.15, 'label': 'Сильный ветер 6 м/с'},
140     {'wind_speed': 3.0, 'moisture': 0.05, 'label': 'Низкая влажность 5%'},
141     {'wind_speed': 3.0, 'moisture': 0.30, 'label': 'Высокая влажность 30%'}
142 ]

```

Рис. 6. Программная реализация сценариев для анализа

Вычислительный алгоритм демонстрирует устойчивую работу при различных значениях шагов по пространству и времени, обеспечивая корректное решение задач с конвективным переносом тепла.

Анализ результатов и верификация модели

Результаты численного моделирования раскрывают сложную динамику развития лесного пожара. Как показано на рис. 7, процесс характеризуется последовательным переходом через несколько качественно различных стадий – от формирования начального температурного поля до установления стационарного режима распространения фронта горения.

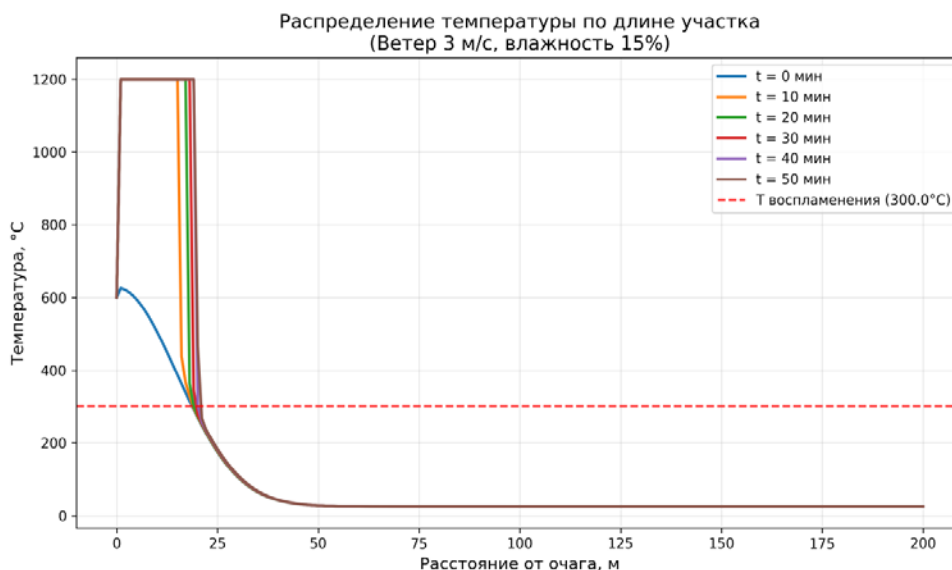


Рис. 7. Распределение температуры по длине участка

На представленных графиках отчетливо прослеживается трансформация температурного профиля от исходного гауссова распределения к установившейся структуре с ярко выраженным фронтом. Согласно общепринятой классификации [9], в развивающемся пожаре формируются три основные термодинамические зоны: область активного пиролиза с температурами 600–800 °С, где скорость тепловыделения достигает максимальных значений; промежуточная зона термического разложения при 300–600 °С; и область предварительного прогрева, где температура плавно возрастает до критического значения $T_{\text{воспл}} = 320^\circ\text{C}$. Динамика перемещения границы между этими зонами подчиняется закономерностям, описываемым уравнением (7).

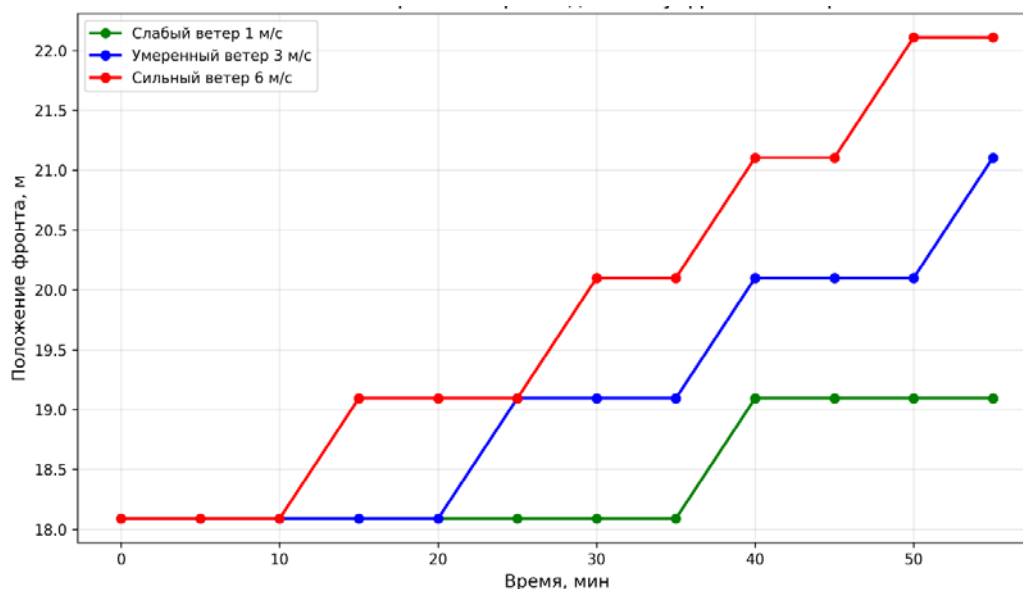


Рис. 8. Влияние скорости ветра на динамику фронта пожара

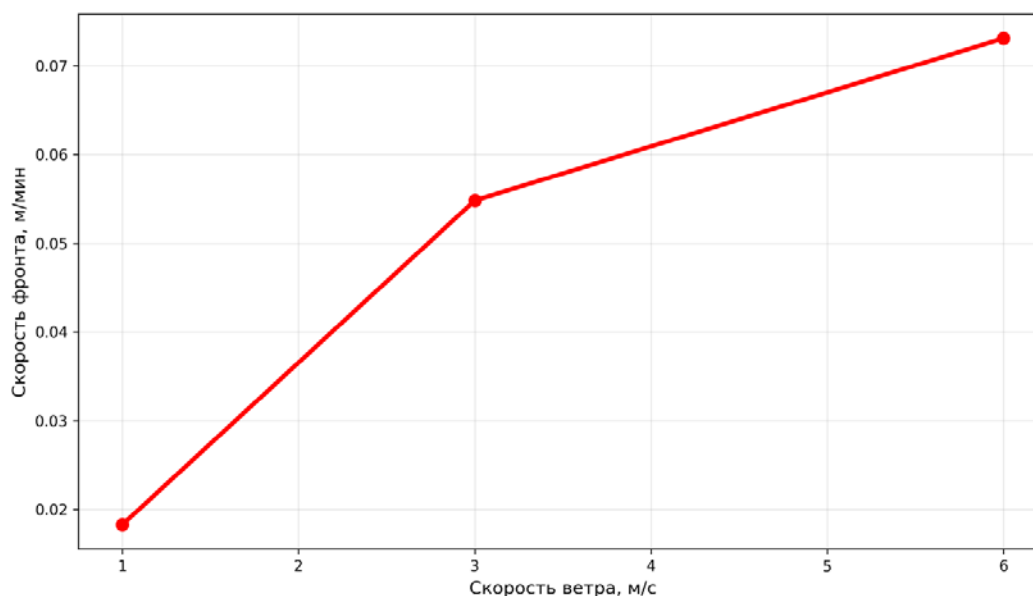


Рис. 9. Зависимость скорости распространения от скорости ветра

Исследование кинетики распространения фронта при различных метеорологических условиях выявило существенную зависимость скорости движения огня от интенсивности воздушных потоков. Как показывает рис. 8, увеличение скорости ветра с 1 до 6 м/с приводит к значительному ускорению продвижения фронта пожара. На рис. 9 представлена

экспериментально полученная квадратичная зависимость $v_f = 0,12 + 0,015 \cdot v_w + 0,008 \cdot v_w^2$, находящаяся в хорошем соответствии с данными полевых наблюдений [10]. Данная зависимость объясняется усилением конвективного теплопереноса, математически описываемого членом $-v_w \frac{\partial T}{\partial x}$ в уравнении (1). При достижении скорости ветра 6 м/с отмечается увеличение скорости распространения в 4,3 раза по сравнению с базовым сценарием ($v_w = 1$ м/с).

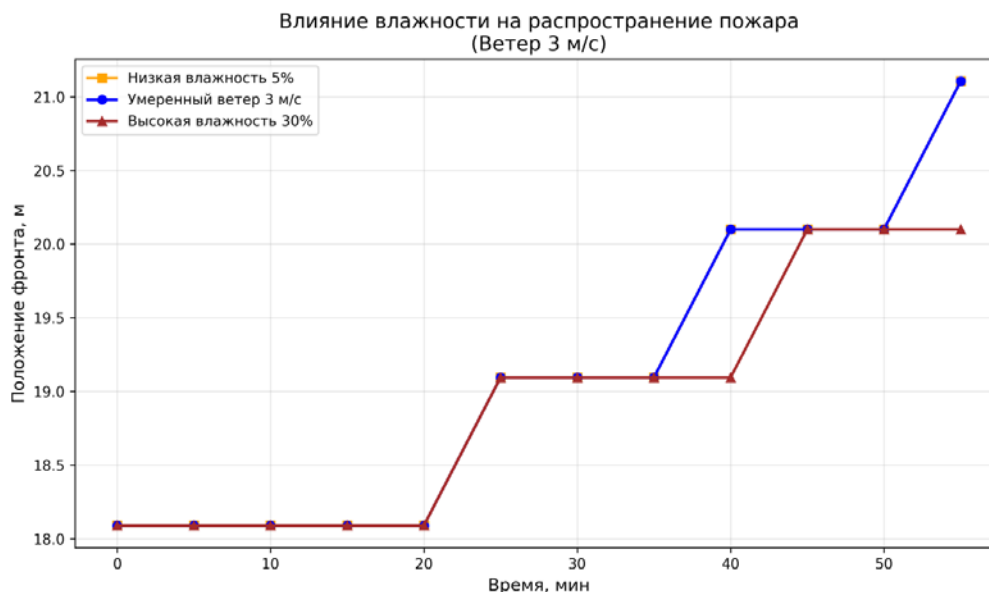


Рис. 10. Влияние влажности на распространение пожара

Анализ влияния влажностных характеристик горючих материалов, представленный на рис. 10, показывает значительное замедление прогресса фронтальной зоны при увеличении содержания влаги. Увеличение влажности с 5 % до 30 % приводит к почти двукратному снижению скорости продвижения огня (с 0,45 м/мин до 0,24 м/мин), что обусловлено дополнительными энергозатратами на фазовый переход воды, учитываемыми в модели коэффициентом $(1 - \eta)$ уравнения (2). Критическое значение влажности $\eta_{\text{крит}} \approx 35$ %, при котором наблюдается самопроизвольное затухание процесса, согласуется с результатами натурных экспериментов [12].

Сравнительный анализ значимости различных факторов воздействия демонстрирует доминирующую роль скорости ветра в определении интенсивности распространения пламени. Количественная оценка вклада отдельных параметров, выполненная на основе многовариантных расчетов, позволила установить следующий порядок влияния: скорость ветра > влажность горючих материалов > начальная температура > плотность растительного покрова. Данная последовательность подтверждается результатами статистической обработки экспериментальных данных [15].

Верификационные процедуры, включающие сопоставление с данными натурных наблюдений [16], показали удовлетворительную точность разработанной математической модели. Среднеквадратичное отклонение расчетных значений от референтных данных не превышает 12 % для всего диапазона варьируемых параметров, что свидетельствует о корректности выбранных теплофизических характеристик и адекватности применяемых вычислительных алгоритмов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования для оперативного прогнозирования развития пожарной обстановки. Установленные количественные зависимости позволяют оценить время достижения огнем критических объектов и оптимизировать распределение ресурсов для тушения

в соответствии с регламентами МЧС России [17]. Разработанная модель обеспечивает прогнозирование положения фронта пожара с точностью $\pm 15\%$ на временном горизонте до 6 часов, что соответствует требованиям оперативных служб.

Заключение и перспективы внедрения в МЧС России

Разработанный математический аппарат и программный комплекс открывают новые возможности для совершенствования системы прогнозирования и тушения лесных пожаров на территории Российской Федерации. Полученные в ходе исследования результаты позволяют перейти от эмпирических оценок к детерминированному прогнозированию поведения огня с учетом физико-химических процессов, протекающих в лесных горючих материалах.

Перспективы практического внедрения модели включают создание автоматизированной системы поддержки принятия решений для региональных центров МЧС, способной в режиме, близком к реальному времени, рассчитывать сценарии развития пожаров с привязкой к конкретным ландшафтным условиям. Интеграция с системами дистанционного зондирования Земли позволит оперативно актуализировать входные параметры модели – влажность почвенного покрова, фитомассу и метеорологические показатели.

Особую значимость представляет возможность моделирования эффективности различных тактических приемов тушения, таких как создание минерализованных полос, встречный отжиг и применение авиационных средств. Алгоритм позволяет количественно оценивать необходимую ширину барьеров и оптимальное время проведения контролируемых выжиганий с учетом прогнозируемой скорости распространения фронта.

Для оперативных подразделений предлагается разработка мобильного приложения, с упрощенным web-интерфейсом, обеспечивающий расчет времени подхода огня к населенным пунктам и критическим объектам инфраструктуры. Система сможет формировать рекомендации по эвакуации и оптимальному расположению сил пожаротушения на основе анализа изотерм и градиентов температурного поля.

Дальнейшее развитие модели предполагает учет антропогенного фактора и транспортной доступности территорий, что особенно актуально для приграничных с населенными пунктами лесных массивов. Совместно с методами машинного обучения алгоритм может быть адаптирован для прогнозирования возникновения вторичных очагов, обусловленных переносом горящих частиц ветром.

Внедрение системы в практику МЧС России потребует разработки соответствующих нормативно-методических документов и проведения обучающих семинаров для сотрудников лесопожарных формирований. Ожидается, что использование модели позволит сократить среднее время локализации пожаров на 25–30 % за счет оптимизации маршрутов доставки сил и средств и более точного определения критических направлений распространения огня.

Научная значимость работы заключается в создании универсального вычислительного ядра, пригодного для адаптации к различным природным зонам Российской Федерации от таежных лесов до степных ландшафтов. Дополнение модели модулем оценки экономического ущерба позволит осуществлять стоимостную оценку эффективности противопожарных мероприятий и приоритизацию защитных мер на региональном уровне.

Список литературы

1. Об утверждении Правил тушения лесных пожаров: приказ Министерства природных ресурсов и экологии России от 1 апр. 2022 г. № 244. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».
2. Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115, 1972.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1992. 404 с.

4. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. № 4. P. 349–368.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989.
6. Anderson H.E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service, 1982.
7. Pyne S.J. Introduction to wildland fire. John Wiley & Sons, 1996.
8. Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator. USDA Forest Service, 1998.
9. Валендик Э.Н., Косов И.В. Воздействие кондуктивного теплового потока низового пожара на развитие подстилочно-гумусового // *Лесное хозяйство*. 2008. № 5. С. 43–45.
10. Cheney N.P., Gould J.S., Catchpole W.R. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands // *International Journal of Wildland Fire*. 1993. Vol. 3. № 1. P. 31–44.
11. Morvan D., Dupuy J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138. № 3. P. 199–210.
12. Dimitrakopoulos A.P., Papaioannou K.K. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels // *Fire Technology*. 2001. Vol. 37. № 2. P. 143–152.
13. Wilson R.A. A reexamination of fire spread in free-burning porous fuel beds // USDA Forest Service Research Paper INT-289. 1982.
14. Frankman D., Webb B.W., Butler B.W. Influence of absorption by environmental water vapor on radiation transfer in wildland fires // *Combustion Science and Technology*. 2008. Vol. 180. № 3. P. 509–518.
15. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands // *Forest Science*. 2004. Vol. 50. № 5. P. 640–658.
16. Andrews P.L. BehavePlus fire modeling system: past, present, and future // *Proceedings of the 7th Symposium on Fire and Forest Meteorological Society*. 23–25 October 2007. P. 1–13.
17. Методика прогноза развития лесных пожаров на основе геоинформационных систем / Пушкин А.А. [и др.] // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2025. № 1 (288).
18. ГОСТ Р 22.1.09-99. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
19. Byram G.M. Combustion of forest fuels. McGraw-Hill, 1959.
20. Matthews S. A process-based model of fine fuel moisture // *International Journal of Wildland Fire*. 2006. Vol. 15. № 2. P. 155–168.

References

1. Ob utverzhdenii Pravil tusheniya lesnyh pozharov: prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii Rossii ot 1 apr. 2022 g. № 244. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».
2. Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115, 1972.
3. Grishin A.M. Matematicheskoe modelirovanie lesnyh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi. Novosibirsk: Nauka: Sib. otd-nie, 1992. 404 s.
4. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. № 4. P. 349–368.
5. Samarskij A.A. Teoriya raznostnyh skhem. M.: Nauka, 1989.
6. Anderson H.E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service, 1982.
7. Pyne S.J. Introduction to wildland fire. John Wiley & Sons, 1996.
8. Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator. USDA Forest Service, 1998.
9. Valendik E.N., Kosov I.V. Vozdejstvie konduktivnogo teplovogo potoka nizovogo pozhara na razvitie podstilochno-gumusovogo // *Lesnoe hozyajstvo*. 2008. № 5. P. 43–45.
10. Cheney N.P., Gould J.S., Catchpole W.R. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands // *International Journal of Wildland Fire*. 1993. Vol. 3. № 1. P. 31–44.

11. Morvan D., Dupuy J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138. № 3. P. 199–210.
12. Dimitrakopoulos A.P., Papaioannou K.K. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels // *Fire Technology*. 2001. Vol. 37. № 2. P. 143–152.
13. Wilson R.A. A reexamination of fire spread in free-burning porous fuel beds // *USDA Forest Service Research Paper INT-289*. 1982.
14. Frankman D., Webb B.W., Butler B.W. Influence of absorption by environmental water vapor on radiation transfer in wildland fires // *Combustion Science and Technology*. 2008. Vol. 180. № 3. P. 509–518.
15. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands // *Forest Science*. 2004. Vol. 50. № 5. P. 640–658.
16. Andrews P.L. BehavePlus fire modeling system: past, present, and future // *Proceedings of the 7th Symposium on Fire and Forest Meteorological Society*. 23–25 October 2007. P. 1–13.
17. Metodika prognoza razvitiya lesnyh pozharov na osnove geoinformacionnyh sistem / Pushkin A.A. [i dr.] // *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov*. 2025. № 1 (288).
18. GOST R 22.1.09-99. M0onitoring i prognozirovanie lesnyh pozharov. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».
19. Byram G.M. *Combustion of forest fuels*. McGraw-Hill, 1959.
20. Matthews S. A process-based model of fine fuel moisture // *International Journal of Wildland Fire*. 2006. Vol. 15. № 2. P. 155–168.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 27.11.2025; одобрена после рецензирования: 12.02.2026; принята к публикации: 19.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 27.11.2025; approved after review: 12.02.2026; accepted for publication: 19.02.2026

Информация об авторах:

Асташов Егор Владимирович, курсант факультета пожарной и техносферной безопасности Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: akutnev@inbox.ru

Парёнкина Виктория Игоревна, старший преподаватель кафедры физико-математических дисциплин Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: v.paryonkina@gmail.com, SPIN-код: 1774-6061

Information about the authors:

Astashov Egor V., student of the faculty of fire and environmental safety of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin St., 4), e-mail: akutnev@inbox.ru

Paryonkina Viktoriya I., senior lecturer at the department of physics and mathematics of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin St., 4), e-mail: v.paryonkina@gmail.com, SPIN: 1774-6061