01

Математическое моделирование динамики распространения фронта верхового пожара в сосновом лесу

© Т.А. Белькова, В.А. Перминов, Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: perminov@tpu.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 13 июня 2025 г.
Принято к публикации 30 июня 2025 г.

Численными методами решена задача распространения фронта верхового пожара в сосновом лесу. Приведена физическая и математическая постановка задачи. Представлена математическая модель распространения пожара в хвойном лесном массиве, основанная на общей математической модели лесных пожаров А.М. Гришина. В ходе расчетов изменены влагосодержание лесного горючего материала, скорость ветра и размер источника зажигания. Получены распределения температуры фронта верхового пожара в различные моменты времени. Показана зависимость изменения размера и геометрии фронта пожара от указанных характеристик.

Ключевые слова: пожар, верховой пожар, сосновый лес, математическое моделирование, метод контрольного объема.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.62989.96-25

Введение

Время обнаружения лесного пожара крайне важно для успешного тушения и минимизации ущерба. Распространяясь во времени, площадь лесного пожара значительно увеличивается. Чем быстрее пожар будет обнаружен, тем раньше будут предприняты меры по его ликвидации, что увеличит шансы на успешную борьбу с огнем. Важно также учитывать доступность ресурсов и оборудования для тушения, чтобы эффективно реагировать на возгорания. В случае задержки в обнаружении пожара или отсутствии необходимых ресурсов, возможно возникновение серьезных последствий. Поэтому необходимо иметь отлаженную систему мониторинга и своевременно реагировать на возникновение пожаров.

Исследование изменения фронта пожара проводится рядом методов, которые помогают изучать процессы горения и распространения пожара. Предпочтительным методом исследования являются натурные эксперименты. В ходе экспериментов контролируется распространение фронта горения и его структура, а также температурное поле фронта [1]. Математическое моделирование позволяет изучать влияние различных факторов на развитие и другие характеристики пожара. При помощи моделей можно определить следующие характеристики пожаров: скорость, температура, плотность и концентрация компонентов, тепловые потоки [2].

Спутниковые изображения служат источником оперативной информации о природных пожарах. Существует метод, который позволяет уточнять положение фронта пожара с учетом погрешностей модельных и спутниковых оценок [3]. В [4] представлен метод мониторинга фронта лесного пожара, объединивший обработку изображений и измерения лучистого теплового потока. Предлагается новый метрологический инструмент, использующий визуальную видеокамеру и несколько тепловых датчиков. Методика определяет положение фронта пожара в зависимости от времени и средние значения длины пламени, угла наклона пламени, температуры пламени и его излучательной способности. Полученные в [4] результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Проведено исследование [5], целью которого было создание модели распространения лесных пожаров на основе искусственной нейронной сети (ANN) применительно к условиям провинции Хэйлунцзян, Китай. Дополнительно были проведены сравнительные тесты модели с моделью клеточного автомата (Wang-Zhengfei's model). Данные для обучения и тестирования моделей были собраны из спутниковых изображений MODIS. Разработанная ANN-модель показала среднюю точность 85.02 %, чувствительность 95.26 %. По сравнению с аналогами ANN имела значительно лучшие показатели. Было выявлено, что основными факторами, влияющими на распространение пожаров, являются средняя температура воздуха, скорость и направление ветра.

Из недостатков работы [5] можно отметить невысокую разрешающую способность спутников MODIS (500×500 m), что ограничивает применение модели для небольших очагов пожаров площадью менее одного гектара. Сюда же можно отнести необходимость постоянного обновления и калибровки модели с учетом

меняющихся климатических условий и антропогенных воздействий.

В [6] представлен метод точной оценки местоположения фронта лесного пожара, которое сложно обнаружить из-за дыма. Предложено использовать измерения потока излучения, полученные датчиками, для оценки положения фронта. Разработан также обратный метод, использующий оценки положения фронта лесного пожара по некоторым измерениям радиационного потока, полученным с помощью „датчиков излучения".

Проблема определения положения, размеров фронта лесного пожара и зависимости от различных характеристик пожара, времени и метеорологических условий остается актуальной задачей. Без комплексного понимания поведения лесных пожаров невозможно создавать эффективные стратегии их предотвращения и борьбы с ними. Исследование лесных пожаров численными методами является перспективным, доступным и безопасным инструментом, позволяющим учитывать факторы пожара и природной среды для получения достоверных результатов.

В исследовании [7] показано распространение верхового пожара при наличии разрывов и заслонов. Установлено, что наличие разрывов значительно замедляет скорость распространения пожара. Заслоны эффективно останавливают распространение пожара, если они расположены перпендикулярно направлению ветра.

В работе [8] проведен ряд численных экспериментов по исследованию распространения низового лесного пожара при наличии противопожарных разрывов. Представлены распределения температурных полей и траектории развития пожаров в зависимости от геометрии и размеров противопожарных барьеров. Результаты могут быть полезны при проектировании противопожарных мероприятий против низовых лесных пожаров.

Исследование [9] посвящено разработке компьютерной модели распространения низовых лесных пожаров в двумерной постановке. Изучены особенности распространения фронта пожара, и получено распределение концентраций кислорода вблизи противопожарных разрывов различной формы и размера. Исследовались круглые противопожарные разрывы площадью от 2.25 до 18 m^2, а также воздействие ветра на сценарии распространения фронта пожара. Установлено, что низкая скорость ветра способствует преодолению пожаром разрывов во всех направлениях, тогда как высокая скорость направляет огонь преимущественно вдоль направления движения ветра [9].

Работа [10] посвящена созданию и проверке математической модели распространения беглых верховых лесных пожаров. Исследование позволило выявить два сценария развития пожара: самозатухание пожара вследствие низкой температуры и высокой влажности, а также устойчивое распространение пожара по направлению ветра. Выявлена взаимосвязь между скоростью ветра, влажностью и плотностью древесины, влияющими на устойчивость горения и распространение пожара. Установлено, что ширина противопожарной полосы менее 4 m временно снижает температуру фронта, позволяя пожару восстановиться после прохождения препятствия. Ширина противопожарной полосы должна составлять минимум 4 m для надежного затухания огня [10].

Авторы [11] представили численную схему для решения системы уравнений типа конвекции–диффузии–реакции, описывающей распространение лесных пожаров. Разработаны две численные схемы: линейно-неявная схема IMEX-RK (LIMEX) и схема с добавлением расщепления Странга (S-LIMEX).

Обе схемы показали хорошее согласие с теоретическими ожиданиями и показали реальную картину распространения пожара. Установлено, узкая полоса (шириной 25 единиц длины ствола дерева) оказалась недостаточно эффективна, поскольку позволяет огню продолжать движение вперед, в то время как широкая полоса (50 единиц длины ствола дерева) предотвращает дальнейшее распространение пожара [11].

В рамках настоящей работы проводится математическое моделирование динамики изменения протяженности и геометрии фронта верхового пожара в сосновом лесу с течением времени. Решалась задача выявления зависимости между размерами фронта пожара и расстоянием, на которое он удалился от источника зажигания. В работе применяется математическая модель, описывающая динамику распространения верхового пожара в хвойном лесу. Основой представленной модели выступает общая математическая модель лесных пожаров, разработанная А.М. Гришиным. В ходе исследования были решены следующие задачи:

1) определение характеристик фронта верхового пожара, включая его геометрические размеры и динамику их изменения во времени;

2) установление взаимосвязи между размерами и геометрией фронта верхового пожара и характеристиками лесного горючего материала (ЛГМ), а также метеорологическими условиями;

3) установление взаимосвязи между размерами и геометрией фронта верхового пожара и размерами источника зажигания.

Решение данных задач позволит расширить инструментарий для выбора размеров противопожарных разрывов. Полученные результаты будут полезны при организации противопожарных мероприятий. Поскольку организация экспериментальных исследований пожаров является сложным, ресурсозатратным и опасным мероприятием, в настоящей работе используются методы математического моделирования. Численные методы позволяют изменять различные характеристики пожара, ЛГМ и метеорологические условия, чтобы произвести комплексную оценку распространения его фронта.

1. Физическая и математическая постановка задачи

Представлена математическая модель, описывающая динамику распространения верхового пожара в сосновом лесу. В основе модели лежит общая математическая модель лесных пожаров, предложенная А.М. Гришиным и описанная в работе [1]. Начальный очаг возгорания характеризуется определенными размерами и размещен в точке начала координат. Вертикальная ось OZ направлена вверх, перпендикулярно земной поверхности, в то время как оси OX и OY расположены горизонтально. Ветер направлен вдоль оси OX. С течением времени, по мере удаления от источника возгорания, форма и размеры фронта пламени пожара претерпевают изменения, что обусловлено воздействием внешних факторов и свойствами ЛГМ. Высота полога леса задавалась равной 10 m для всех вариантов численных расчетов. Схема расчетной области приведена на рис. 1.

Для исследуемой системы уравнений были сделаны следующие допущения:

1) лесной массив представлен как многофазная многокомпонентная пористо-дисперсная реакционноспособная среда;

2) лесной массив моделируется как однородная двухтемпературная система, где температура газовой фазы отличается от температуры конденсированной фазы;

3) крона леса представлена как недеформируемая пористая среда, влияющая на коэффициент сопротивления в уравнении сохранения импульса для газовой фазы;

4) объемная доля конденсированной фазы (сухие органические вещества, вода в жидко-капельном состоянии, твердые продукты пиролиза и зола) мала по сравнению с объемом газовой фазы, включающей воздух и газообразные продукты горения и пиролиза;

5) воздушные потоки внутри рассматриваемой области имеют турбулентный характер;

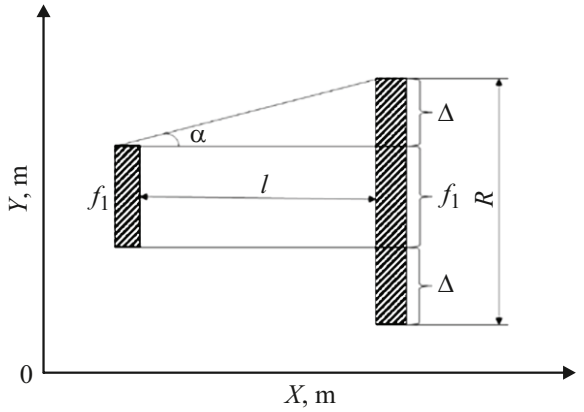


Рис. 1. Схема расчетной области, где f_1 — первоначальный размер очага верхового пожара; R — размер фронта в момент времени t; Δ — приращение размера фронта; α — угол между очагом и фронтом; l — расстояние между первоначальным очагом и фронтом.

6) учитывая низкую скорость газового потока относительно скорости звука, плотность газа принимается практически постоянной и независимой от изменений давления.

Различают температуру конденсированной (твердой) T_s и газовой T фаз. Первая включает в себя сухое органическое вещество, влагу, конденсированные продукты пиролиза и минеральную часть ЛГМ. В газовой фазе выделим только компоненты, необходимые для описания реакции горения, т.е. массовые концентрации c_α ($\alpha = 1$ — кислород, 2 — горючие продукты пиролиза ЛГМ, 3 — другие инертные компоненты, включая водяной пар). Считается, что полог леса можно моделировать недеформируемой однородной двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой. В настоящей работе рассматривается так называемый продуваемый лесной массив, когда объемной долей конденсированной фазы ЛГМ, состоящей из сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы, включающей в себя компоненты воздуха и газообразные продукты пиролиза и горения. Твердой фазы приходится меньше 0.5 kg на единицу объема леса. Твердая фаза считается недеформируемой и неподвижной. Считается, что среда находится в локальном термодинамическом равновесии. Турбулентный конвективный перенос, обусловленный действием силы тяжести, описывается с помощью уравнений Рэйнольдса.

Поскольку вертикальные размеры лесного массива существенно уступают горизонтальным, система дифференциальных уравнений, описывающая процессы тепло- и массообмена, может быть интегрирована по высоте лесного полога h. После преобразования исходных уравнений в дивергентную форму они интегрируются по высоте лесного полога:

$$\int_0^h \phi dz = \overline{\phi} h, \tag{1}$$

где $\overline{\phi}$ — среднее значение величины ϕ. В конечном счете, поставленная задача сводится к поиску решений системы уравнений Рэйнольдса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = \dot{m} - (\dot{c}^- - \dot{c}^+)/h, \tag{2}$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho\overline{u'^2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\rho\overline{u'v'}\right) - \rho s c_d u|\mathbf{v}| - \dot{m}u + (\tau_x^- - \tau_x^+)/h, \tag{3}$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho\overline{u'v'}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\rho\overline{v'^2}\right) - \rho s c_d v|\mathbf{v}| - \dot{m}v + (\tau_y^- - \tau_y^+)/h, \tag{4}$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho c_p \overline{u'T'}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\rho c_p \overline{v'T'}\right) + q_5 R_5 - \alpha_V (T - T_s) + (q_T^- - q_T^+)/h + k_g (cU_R - 4\sigma T^4), \tag{5}$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho\overline{u'c'_\alpha}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\rho\overline{v'c'_\alpha}\right) + R_{5\alpha} - \dot{m}c_\alpha + (J_\alpha^- - J_\alpha^+)/h; \quad \alpha = \overline{1,2}, \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial y}\right) - kcU_R + 4k_g\sigma T^4 + 4k_s\sigma T_s^4 + \frac{(q_R^- - q_R^+)}{h} = 0, \quad k = k_g + k_s, \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{4}\rho_i\varphi_i c_{pi}\frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3R_3 - q_2R_2 + k_s(cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_V(T - T_s), \tag{8}$$

$$\rho_1\frac{\partial\varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2\frac{\partial\varphi_2}{\partial t} = -R_2,$$

$$\rho_3\frac{\partial\varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1}R_3, \quad \rho_4\frac{\partial\varphi_4}{\partial t} = 0, \tag{9}$$

$$\sum_{\alpha=1}^{3} c_\alpha = 1, \quad p_e = \rho RT\sum_{\alpha=1}^{3}\frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \tag{10}$$

$$\dot{m} = (1-\alpha_c)R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1}R_3, \tag{11}$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2}R_5, \quad R_{52} = \upsilon_c(1-\alpha_c)R_1 - R_5. \tag{12}$$

Формулы (13)–(16) описывают скорости пиролиза, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза:

$$R_1 = k_1\rho_1\varphi_1\exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), \tag{13}$$

$$R_2 = k_2T_S^{-0.5}\rho_2\varphi_2\exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right), \tag{14}$$

$$R_3 = k_3\rho s_\alpha\varphi_3 c_1\exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), \tag{15}$$

$$R_5 = k_5M_2(c_1M/M_1)^{0.25}(c_2M/M_2)T^{-2.25}\exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right). \tag{16}$$

При решении вышеизложенной системы уравнений следует учитывать следующие начальные и граничные условия:

$$t = 0: \ u = 0;\ \upsilon = 0;\ T = T_e;\ c_\alpha = c_{\alpha e};\ T_s = T_e;\ \varphi_i = \varphi_{ie}; \tag{17}$$

$$x = 0: \ u = V_e;\ \upsilon = 0;\ T = T_e;\ c_\alpha = c_{\alpha e};$$

$$-\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \tag{18}$$

$$x = x_e: \ \frac{\partial u}{\partial x} = 0;\ \frac{\partial\upsilon}{\partial x} = 0;\ \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} = 0;\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \tag{19}$$

$$y = -\frac{y_e}{2}: \ \frac{\partial u}{\partial y} = 0;\ \frac{\partial\upsilon}{\partial y} = 0;\ \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0;\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$-\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0; \tag{20}$$

$$y = \frac{y_e}{2}: \ \frac{\partial u}{\partial y} = 0;\ \frac{\partial\upsilon}{\partial y} = 0;\ \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0;\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0. \tag{21}$$

Координаты очага зажигания $0 \le x \le \delta_x$; $-\delta_y/2 \le y \le \delta_y/2$, где δ_x и δ_y — размеры очага по оси OX и OY соответственно. Величина температуры в очаге зажигания изменяется в зависимости от времени:

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + \dfrac{t}{t_0}(T_0 - T_e), & t \le t_0, \\ T_e + (T_0 - T_e)\exp\left[-k_0\left(\dfrac{t}{t_0} - 1\right)\right], & t > t_0. \end{cases} \tag{22}$$

Здесь t_0 — время формирования очага, после чего очаг зажигания отключается, температура уменьшается с течением времени до начального значения T_e согласно второй формуле в (22); k_0 — коэффициент затухания очага. Температура изменяется при $t > t_0$ от $T_0 = 1000$ K до значения $T_e = 300$ K.

Считая, что тепломассообмен во фронте пожара с приземным слоем атмосферы и нижним ярусом леса происходит по закону Ньютона, то соответствующие члены уравнений можно записать в следующем виде:

$$\frac{J_\alpha^- - J_\alpha^+}{h} = -\frac{\alpha}{c_{ps}h}(c_\alpha - c_{\alpha e}), \tag{23}$$

$$\frac{q_T^- - q_T^+}{h} = -\frac{\alpha}{h}(T - T_e). \tag{24}$$

В уравнениях (1)–(24) используются следующие обозначения: R_1–$R_3, R_5, R_{5\alpha}$ — массовые скорости пиролиза ЛГМ, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования α-компонентов газодисперсной фазы; $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ — удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля i-й фазы ($i = 1$ — сухое органическое вещество, 2 — вода в жидко-капельном состоянии, 3 — конденсированные продукты пиролиза, 4 — минеральная часть); τ_i, q_T, J_α — характеристики обмена импульсом, энергией и массой компонента α как с приземным слоем атмосферы, так и с нижним ярусом леса; T, T_s — температура газовой и конденсированной фаз; c_α — массовая концентрация ($\alpha = 1$ — кислород, 2 — летучие продукты пиролиза, 3 — инертные компоненты воздуха); p — давление; U_R — плотность энергии излучения; σ — постоянная Стефана–Больцмана; k — коэффициент ослабления излучения; k_g, k_s — коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_v — коэффициент обмена фаз; q_i, E_i, k_i — тепловой эффект, энергия активации и предэкспоненциальный множитель реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ — удельная поверхность элемента ЛГМ; M_α, M_C, M — молекулярные

массы индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s, c_d — удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления растительности [13]; c — скорость света; u, v — проекции вектора скорости течения в газовой фазе на оси X, Y соответственно; a_c, v_c — коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; $\dot{m}$ — массовая скорость образования газодисперсной фазы; g — ускорение свободного падения. Индекс «0» относится к параметрам в очаге горения, индекс «e» — к параметрам на большом расстоянии от зоны пожара [2]. Символом d/dt обозначена полная производная:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y}.$$

Коэффициент теплообмена фаз выбирался на основе данных по теплообмену между элементом ЛГМ (хвоинка, тонкая веточка) и окружающей средой α по формуле:

$$\alpha_V = \alpha S - \gamma c_p \dot{m}, \quad S = 2\varphi_s / r_s,$$

где γ — отношение молекулярных масс газа в окружающей среде и выдуваемого в процессе теплообмена; $\varphi_s = \Sigma_{i=1}^{4}\varphi_i$, r_s — радиус цилиндра (типичный элемент ЛГМ) [1].

Компоненты тензора турбулентных напряжений, турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты среднего течения согласно [2]:

$$\rho\overline{u'^2} = 2\mu_t\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}K, \quad \rho\overline{v'^2} = 2\mu_t\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}K,$$

$$-\rho\overline{u'v'} = \mu_t\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right),$$

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho K^2}{\varepsilon}, \quad -\overline{\rho u' c_p T'} = \lambda_t\frac{\partial T}{\partial x},$$

$$\lambda_t = \mu_t c_p / Pr_t, \quad -\overline{\rho v' c_p T'} = \lambda_t\frac{\partial T}{\partial y},$$

$$-\overline{\rho u' c'_\alpha} = \rho D_t\frac{\partial c_\alpha}{\partial x},\ \rho D_t = \mu_t / Sc_t,\ -\overline{\rho v' c'_\alpha} = \rho D_t\frac{\partial c_\alpha}{\partial y}. \tag{25}$$

Здесь u', v' — компоненты пульсационной составляющей скорости в проекциях на оси X, Y соответственно; μ_t — коэффициент турбулентной динамической вязкости, определяемый на основе локально-равновесной модели турбулентности [2]:

$$\mu_t = \rho l^2\left\{2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 - \frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right\}^{1/2}. \tag{26}$$

Здесь λ_t, D_t — коэффициенты турбулентной теплопроводности и диффузии; c_μ — константа; ε — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; K — кинетическая энергия турбулентности; Pr_t, Sc_t — турбулентные числа Прандтля и Шмидта; l — путь смешения [2].

Термокинетические, теплофизические и структурные характеристики лесного массива соответствуют ЛГМ соснового леса: $E_1/R = 9400\,\mathrm{K}$, $k_1 = 3.63\cdot 10^4\,\mathrm{s}^{-1}$, $E_2/R = 6000\,\mathrm{K}$, $k_2 = 6\cdot 10^5\,\mathrm{s}^{-1}$, $q_2 = 3\cdot 10^6\,\mathrm{J/kg}$, $E_3/R = 10\,000\,\mathrm{K}$, $k_3 = 10^3\,\mathrm{s}^{-1}$, $q_3 = 1.2\cdot 10^7\,\mathrm{J/kg}$, $E_5/R = 11\,500\,\mathrm{K}$, $k_5 = 3\cdot 10^{13}\,\mathrm{s}^{-1}$, $q_5 = 10^7\,\mathrm{J/kg}$, $c_p = 1000\,\mathrm{J/(kg\cdot K)}$, $\alpha_c = 0.06$, $\nu_c = 0.7$, $\rho_e = 1.2\,\mathrm{kg/m^3}$, $c_{2e} = 0$, $p_e = 10^5\,\mathrm{N/m^2}$, $T_e = 300\,\mathrm{K}$, $c_{1e} = 0.23$ [2].

Использован метод контрольного объема [12] для дискретизации системы с заданными начальными и граничными условиями. Для решения задачи был использован алгоритм, декомпозирующий физические процессы: сначала рассчитывались параметры течения и распределение скалярных величин без учета химических реакций. Затем решались уравнения химической кинетики, учитывая источниковые члены в правых частях уравнений, что позволило определить температурные поля и концентрации компонентов [2].

Фронт верхового пожара перемещается по лесному массиву. Расположение и размеры фронта пожара изменяются в зависимости от скорости ветра, характеристик ЛГМ и размеров источника зажигания. Сценарий распространения пожара имеет следующие варианты:

— распространение фронта верхового пожара происходит одновременно в направлении осей OX и OY, размеры фронта лесного пожара не претерпевают существенных изменений;

— распространение фронта верхового пожара происходит более интенсивно в направлении одной из осей, вследствие чего размеры и геометрия фронта пожара изменяются;

— размер источника зажигания, характеристики ЛГМ и скорость ветра способствуют изменению геометрии и размеров фронта верхового пожара.

Размеры расчетной области составляют $100\times 50\,\mathrm{m}$. Высота полога леса задавалась равной 10 m. Область разбивается на 301×101 контрольный объем по осям OX и OY соответственно. Температура окружающей среды составляет 300 K [1]. Под воздействием ветра верховой пожар начинает распространяться по сосновому лесному массиву.

Моделирование проводилось на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-13700K, 64 Gb оперативной памяти DDR5 и видеокартой NVIDIA RTX 4090. Для визуализации полученных данных использовался программный комплекс MATLAB. Общее время, затраченное на проведение расчетов, не превышало 30 min.

2. Результаты расчетов и их анализ

С использованием методов математического моделирования были проведены численные расчеты, позволив-

Таблица 1. Зависимость между первоначальным размером очага и размером фронта пожара при разных расстояниях от источника зажигания

Ширина источника зажигания 5 m		Ширина источника зажигания 10 m	
R, m	l, m	R, m	l, m
9.7	5	17.7	5
15.6	10	19.8	10
15.8	15	21.5	15
16.4	20	22.0	20
22.7	25	29.3	25
25.8	30	30.1	30
26.3	35	32.9	35

шие получить распределения полей скорости, температуры, концентраций кислорода и продуктов горения, а также объемных долей фаз фронта верхового лесного пожара в различные моменты времени. Температура газовой фазы определялась как $\overline{T} = T/T_e$, где $T_e = 300$ K, распределения изотерм газовой фазы (1 — $\overline{T} = 5$, 2 — $\overline{T} = 4$, 3 — $\overline{T} = 3$, 4 – $\overline{T} = 2.5$, 5 — $\overline{T} = 2$, 6 — $\overline{T} = 1.5$, 7 — $\overline{T} = 1.3$) показаны на рис. 2–4 далее.

Решена задача распространения лесного верхового пожара при следующих условиях: скорость ветра равна 7 m/s, запас ЛГМ 0.4 kg/m^3, влагосодержание 0.5 [1]. Источник зажигания имеет конечные размеры: в направлении оси OX источник имеет размер 1.5 m, в направлении OY — 5 и 10 m. Изучено распространение фронта верхового пожара в хвойном лесном массиве. Полученное распределение температуры в различные моменты времени представлено на рис. 2.

Проанализировав полученное распределение изотерм (рис. 2), можно утверждать, что начальные параметры источника зажигания определяют масштабы распространения лесного пожара вдоль оси OX. При размере источника зажигания, равном 10 m, (рис. 2, b) размер фронта пожара в направлении OX значительно больше по сравнению с фронтом пожара, возникшим от источника, равного 5 m (рис. 2, a). Аналогично определена зависимость между размером фронта пожара в направлении OX и расстоянием от фронта пожара до источника зажигания. Результаты сведены в табл. 1.

Анализ полученных данных (табл. 1) показал, что при распространении лесного пожара изменяется форма и размеры его фронта. Фронт пожара распространяется как в направлении оси OX, так и в направлении OY. Увеличение размеров источника зажигания ведет к пропорциональному увеличению размера фронта пожара в направлении оси OY.

Определено влияние влагосодержания ЛГМ на зависимость между первоначальным размером очага и размером фронта пожара. Решена задача с упомянутыми выше условиями при влагосодержании 0.5 (рис. 2) и с увеличением влагосодержания ЛГМ до 0.6. Размеры источника зажигания в направлении оси OY приняты 5 и 10 m соответственно для первой (рис. 3, a) и второй (рис. 3, b) задач. Получено распределение изотерм в различные моменты времени (рис. 3).

Анализ распределения изотерм (рис. 3) показал, что увеличение влагосодержания ЛГМ (по сравнению с результатами расчетов, представленными на рис. 2) способствует уменьшению расстояния, которое прошел пожар от точки возгорания за определенное время (l) в направлении оси OX. За счет высокого влагосодержания в ЛГМ пожар затрачивает большее количество энергии на нагрев и сушку ЛГМ, вследствие чего тратится большее количество энергии пожара. Таким образом, лесной пожар преимущественно развивается вдоль оси OX, однако интенсивность его продвижения постепенно снижается. Определена зависимость между первоначальным размером очага и фронтом пожара при различном расстоянии l. Данные представлены в табл. 2.

Согласно полученным данным (табл. 2), величина изменения размеров фронта пожара Δ линейно возрастает при удалении фронта пожара от первоначального очага. При увеличении размера источника зажигания Δ также увеличивается.

Проанализировано поведение фронта верхового лесного пожара при изменении скорости ветра. Исходные данные для расчетов: запас ЛГМ 0.4, влагосодержание ЛГМ 0.5, размер источника зажигания составляет 5 m вдоль оси OY. Исследовано изменение размеров и геометрии фронта лесного пожара при скоростях ветра 10 и 15 m/s. Распределения полей температуры при разных временных значениях отображены на рис. 4.

Анализ полученных результатов (рис. 4) показал, что скорость ветра влияет на изменение размеров и геометрии фронта лесного пожара. При скорости ветра 10 m/s (рис. 4, a) фронт пожара смещается вдоль оси OX, при этом заметно изменяется его протяженность в направлении оси OY. Когда скорость ветра возрастает до 15 m/s (рис. 4, b), фронт пожара ускоренно движется вдоль

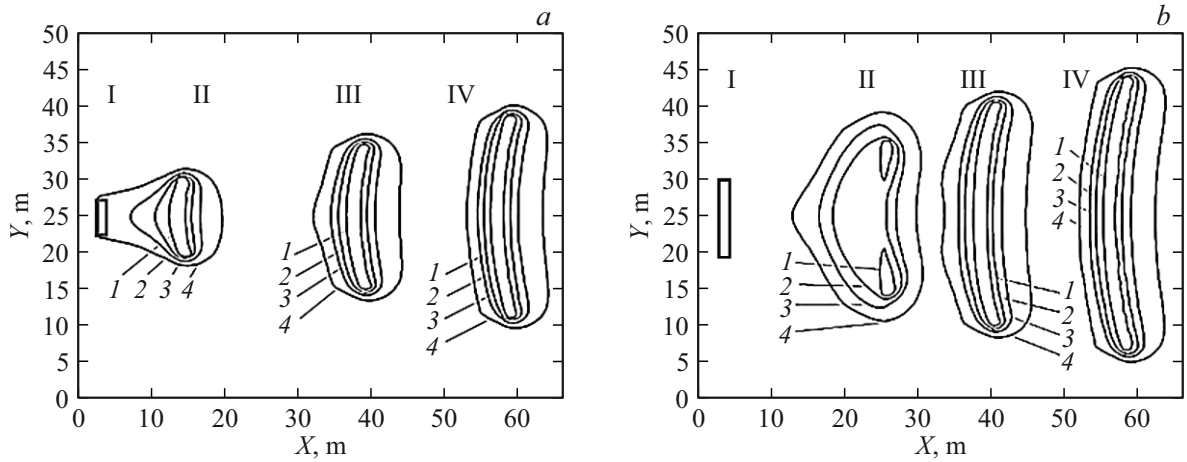


Рис. 2. Распределения изотерм фронта лесного пожара при первоначальном размере очага 5 (*a*) и 10 m (*b*) и влагосодержании 0.5 и скорости ветра 7 m/s в моменты времени $t = 2$ (I), 3 (II), 8 (III), 12 s (IV) ($\overline{T} = 1 - 5$, *2* — 3, *3* — 2, *4* — 1.3).

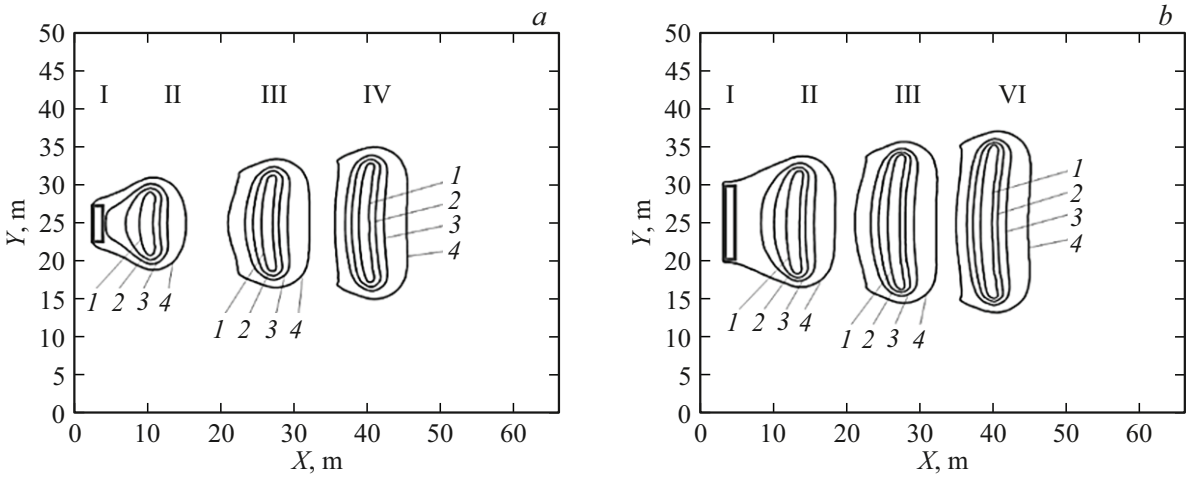


Рис. 3. Распределения изотерм фронта лесного пожара при первоначальном размере очага 5 (*a*) и 10 m (*b*) и влагосодержании 0.6 в моменты времени $t = 2$ (I), 3 (II), 8 (III), 12 s (VI) ($\overline{T} = 1 - 5$, *2* — 3, *3* — 2, *4* — 1.3).

Таблица 2. Зависимость между первоначальными размерами очага и размерами фронта пожара при разном расстоянии от источника при влагосодержании 0.6

Ширина источника зажигания 5 m		Ширина источника зажигания 10 m	
R, m	l, m	R, m	l, m
9.7	5	17.9	5
15.5	10	20.2	10
16.3	15	21.8	15
16.5	20	22.0	20
22.8	25	22.8	25
25.5	30	23.7	30
26.0	35	24.0	35

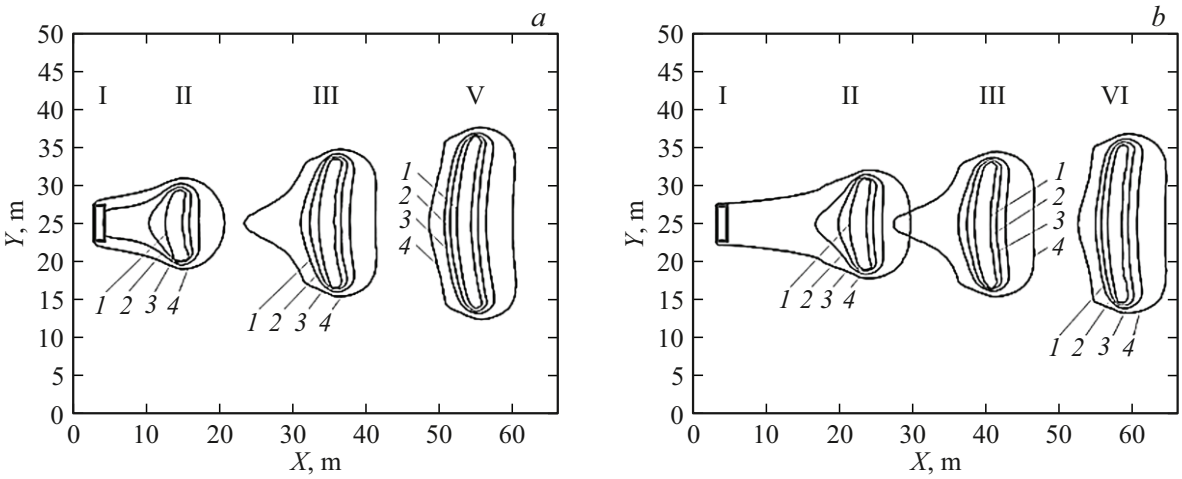


Рис. 4. Распределения изотерм фронта лесного пожара при скоростях ветра 10 (a) и 15 m/s (b) в моменты времени $t = 2$ (I), 3 (II), 6 (III), 8 (VI), 14 s (V) ($\overline{T} = 1 - 5$, 2 — 3, 3 — 2, 4 — 1.3).

Таблица 3. Взаимосвязь между исходными размерами источника зажигания и размерами фронта пожара при скоростях ветра 10 и 15 m/s

Скорость ветра 10 m/s		Скорость ветра 15 m/s	
R, m	l, m	R, m	l, m
9.3	5	14.2	5
11.6	10	15.6	10
15.2	15	17.4	15
17.5	20	19.0	20
20.3	25	21.0	25
22.0	30	23.0	30
24.3	35	25.0	35

оси OX, а в направлении оси OY его распространение становится более выраженным. В направлении оси OY фронт пожара имеет меньшие размеры по сравнению с задачей при скорости ветра 10 m/s (рис. 4, a).

Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Проанализировав данные расчетов (табл. 3), можно сделать вывод, что скорость ветра значительно влияет на расстояние, которое проходит пожар от источника зажигания (l). При возрастании скорости ветра движение фронта пожара приобретает большую динамику вдоль оси OX, аналогичные результаты получены при наблюдении реального пожара [13].

Отдельно отметим причины геометрической серповидной формы фронта верхового пожара, характерную для всех вышеприведенных рисунков. Очаг горения тормозит горизонтальный ветровой поток, создавая зону пониженного давления и снижения скорости ветра вблизи очага. Ветер, встречая такое препятствие, обтекает зону горения. Эффект обтекания ветрового потока вокруг зоны горения приводит к увеличению скорости ветра на флангах. Это способствует лучшему поступлению кислорода, что способствует более быстрому распространению огня. Центр отстает, фланги выдвигаются — фронт приобретает серповидную форму, выгнутую в сторону распространения огня.

3. Выявление закономерностей изменения размера фронта пожара R в зависимости от скорости ветра, расстояния до первоначального очага и источника зажигания

Размеры фронта пожара зависят от различных условий. Определение данной зависимости поможет проектировать противопожарные разрывы оптимальных размеров против верховых пожаров. Это позволит сократить затраты на организацию борьбы с огнем, а также сделать ее более эффективной и сберечь лесной массив.

Исследована зависимость расстояния от источника до фронта от влагосодержания ЛГМ (рис. 5). При влагосодержании 0.5 и 0.6 график представляет собой возрастающую функцию. Повышение уровня влагосодержания ЛГМ приводит к сокращению протяженности фронта пожара вдоль оси OX. Установлено, что функция зависимости влагосодержания ЛГМ от расстояния l изменяется по линейному закону:

$$y = 0.5x + 10. \qquad (27)$$

Исследована зависимость размера источника зажигания от размера фронта лесного пожара (рис. 6). В обоих случаях график представляет собой линейно возрастающую функцию. При размере источника зажигания,

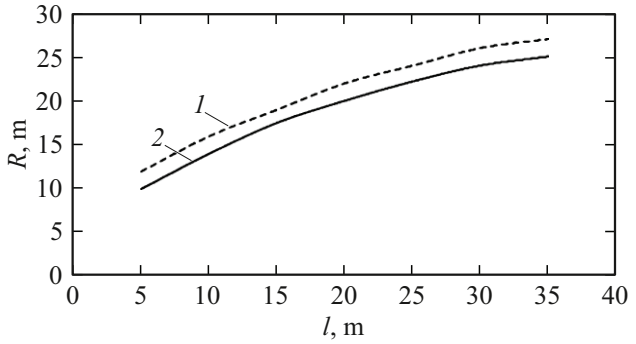


Рис. 5. Зависимость между размером фронта лесного пожара R от расстояния от фронта до очага l при влагосодержании ЛГМ 0.5 (*1*) и 0.6 (*2*).

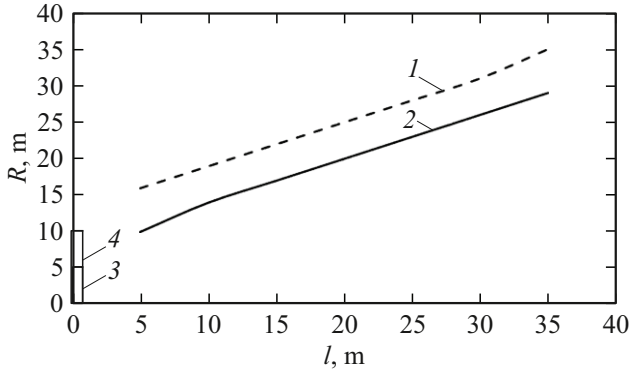


Рис. 6. Зависимость между размером фронта лесного пожара R от расстояния до очага l при источнике зажигания, равном вдоль OY 5 (*1*) и 10 m (*2*), и первоначальные источники зажигания размерами 1.5×5 (*3*) и 1.5×10 m (*4*).

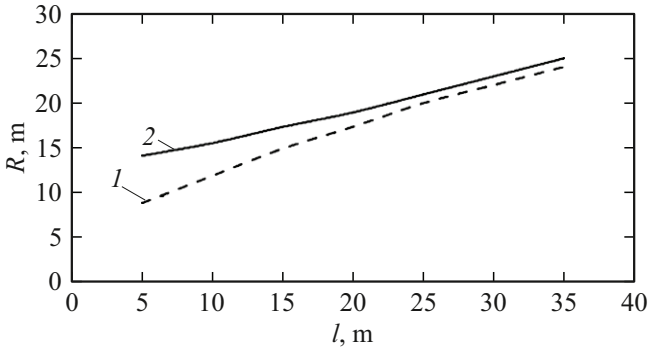


Рис. 7. Зависимость размера фронта R пожара от расстояния между фронтом и очагом l при скоростях ветра 10 (*1*) и 15 m/s (*2*).

равном 10 m вдоль OY, размер фронта имеет больший размер на всем протяжении времени распространения пожара по сравнению с пожаром, возникшим от источника размером 5 m вдоль той же оси.

Определена зависимость размера фронта пожара R от расстояния до очага пожара l (рис. 6). На рисунке видно, что график в обоих случаях представляет собой линейную монотонно возрастающую функцию. При размере источника зажигания, равном 10 m, график функции отличается вертикальным смещением вдоль OY, что обусловлено активным продвижением пожара в направлении оси OY. Пожаром расходуется большее количество энергии по всему размеру фронта по направлению данной оси.

Исследована зависимость размера фронта пожара от расстояния между фронтом и очагом при различных скоростях ветра (рис. 7). Анализ графиков показывает, что увеличение скорости ветра способствует уменьшению размеров фронта пожара: чем сильнее ветер, тем компактнее зона возгорания. При скорости ветра 15 m/s фронт пожара активнее перемещается вдоль оси OX, тогда как при 10 m/s фронт равномерно распространяется по осям OX и OY одновременно.

Проанализировав полученные данные о влиянии скорости ветра на геометрию и размеры фронта лесного пожара (рис. 7), можно сделать вывод, что график представляет собой линейную зависимость. Повышение скорости ветра усиливает распространение пожара главным образом вдоль оси OX, совпадающей с направлением движения воздушных масс.

Выводы

В рамках выполненного исследования проанализирована взаимосвязь между размерами фронта верхового пожара и скоростью ветра, расстоянием до источника возгорания и его размерами. Основываясь на полученных данных, сформулированы следующие выводы:

1. Размер фронта верхового пожара с течением времени увеличивается в направлении оси OY (ось расположена перпендикулярно направлению распространения фронта пожара) по линейному закону. На размер и геометрию фронта пожара оказывают влияние характеристики ЛГМ и метеорологические условия.

2. По мере увеличения влагосодержания ЛГМ наблюдается сокращение размеров фронта пожара в направлении оси OY. Это объясняется снижением интенсивности горения, что ограничивает распространение огня вдоль данной оси. В результате такой эффект приводит к более локализованному развитию пожара, ограничивая его размеры по оси OY.

3. Увеличение размера источника зажигания вдоль OY существенно влияет на размеры и геометрию фронта лесного пожара. Увеличение размеров источника вдоль OY приводит к увеличению масштаба распространения пожара вдоль данной оси.

4. Скорость ветра оказывает значительное влияние на распространение фронта лесного пожара. При сильной скорости ветра пожар продвигается преимущественно вдоль оси OX, т.е. по направлению скорости ветра. Это подтверждается численными и экспериментальными

исследованиями [14,15] и результатами, полученными при наблюдении за реальным пожаром [16].

Полученные в работе результаты могут быть полезны специалистам лесного хозяйства для более точного расчета требуемых размеров противопожарных разрывов, что, в свою очередь, будет способствовать повышению уровня пожарной безопасности в лесах и для близлежащих к лесному массиву объектов инфраструктуры. Интересным направлением развития видится внедрение математического моделирования в процесс геомониторинга лесных пожаров.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект РНФ № 24-21-00069).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.М. Гришин, А.И. Фильков, Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, Ю.А. Руди, В.Т. Кузнецов, В.В. Караваев. Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика, **2** (14), 91 (2011).
[2] В. Перминов. *Математическое моделирование лесных пожаров* (LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2011)
[3] С.В. Патанкар. *Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течениях в каналах* (Изд-во МЭИ, М., 2003)
[4] С.А. Хвостиков, С.А. Барталев. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли и космоса, 5* (19), 178 (2022).
[5] S. Rudz, K. Chetehouna, O. Séro-Guillaume. Fire Technol., 47 (2011). DOI: 10.1007/s10694-010-0157-x
[6] R. Bürger, E. Gavilán, D. Inzunza, P. Mulet, V.L. Miguel. Mathematics, **8** (6), 1034 (2020). DOI: 10.3390/math8061034
[7] M. Bergmann, D. Bernardin, S. Ramezani, O. Séro-Guillaume. *On the estimation of the forest fire front position by radiative flux measurement. Remote Sensing* (2006), p. 16.
[8] В.И. Марзаева. ЖТФ, **89** (8), 1141 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47883.392-18 [V. Marzaeva. Tech. Phys., **64** (8), 1073 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219080139]
[9] Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук. Журнал БГУ, **2**, 82 (2022). DOI: 10.33581/2520-6508-2022-2-82-93
[10] D.V. Barovik, V.B. Taranchuk. Balt. J. Mod. Comput., **2** (11), 226 (2023). DOI: 10.22364/bjmc.2023.11.2.01
[11] D.V. Barovik, V.B. Taranchuk. MMA, **15** (2), 161 (2010). DOI: 10.3846/1392-6292.2010.15.161-174
[12] S.V. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow* (Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980)
[13] А.М. Гришин. *Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними* (Наука, Новосибирск, 1992)
[14] A. Viseras, M. Meissner, J. Marchal. IEEE Access., **4**, 123269 (2016). DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3055651
[15] R.H. Thomas. Forestry, **2** (44), 155 (1971).
[16] R.O. Weber. Prog. Energ. Combust. Sci., **17**, 67 (1990).