

Математическое моделирование воздействия противопожарных разрывов и заслонов на распространение верховых лесных пожаров

© Т.А. Белькова, В.А. Перминов

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

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

Представлено численное исследование эффективности противопожарных разрывов и заслонов для предотвращения распространения верховых лесных пожаров при помощи математического моделирования. Рассмотрены разрывы и заслоны из лиственных пород деревьев, а также их комбинация. В ходе расчетов изменялась скорость ветра, запас и влагосодержание лесных горючих материалов. Результаты показали, что заслоны из лиственных деревьев более эффективны в условиях высокого влагосодержания заслона и низкой скорости ветра. Определены оптимальные размеры разрывов и заслонов на основе численного моделирования. Установлено, что для предотвращения распространения пожара рекомендовано использовать разрывы, а также их комбинацию с заслонами, в последнем случае площадь неиспользованных земель уменьшается на 30 %.

Ключевые слова: лесной пожар, верховой пожар, противопожарный разрыв, противопожарный заслон, математическое моделирование, численное решение.

DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62029.96-25

Введение

Верховые лесные пожары являются одной из самых опасных и разрушительных форм лесных пожаров, характеризующейся высокой интенсивностью пламени, быстро распространяющемуся по пологу леса. Эти пожары особенно распространены в хвойных лесах, где низкое влагосодержание горючих материалов, высокое содержание смолы и вертикальная непрерывность горючих материалов способствуют возгоранию кроны и устойчивому распространению пожара. Изменение климата и увеличение запасов горючих материалов способствуют росту частоты и интенсивности верховых пожаров, что усиливает необходимость в эффективных стратегиях профилактики и локализации возгораний.

Чтобы снизить скорость распространения пожара и минимизировать ущерб, часто используются противопожарные барьеры — зоны или полосы в ландшафте, где растительность была удалена или существенно изменена для нарушения непрерывности размещения лесных горючих материалов (ЛГМ). Противопожарные барьеры могут быть разрывами (например, бульдозерные полосы, дороги, вспаханные полосы) или заслонами (например, полосы огнестойкой растительности, такой как лиственные деревья). Эти меры направлены на предотвращение перехода низовых пожаров на полог и сдерживание горизонтального распространения огня в лесном массиве.

Исследования эффективности противопожарных полос показали, что их ширина, ориентация относительно направления ветра и обслуживание имеют решающее значение для их эффективности. Такие исследования,

как [1,2], продемонстрировали, что узких противопожарных полос часто недостаточно при сильном ветре или экстремальных пожароопасных погодных условиях. Finney M.A. в [3] использовал пространственное моделирование, чтобы продемонстрировать, что сети противопожарных полос могут изменять характер распространения пожаров, особенно в сочетании с обработкой горючих материалов. Catchpole W.R. и др. в работе [4] подчеркнули, что эффективность противопожарных полос возрастает при интеграции с ландшафтным планированием и когда их размещение учитывает топографию и преобладающий ветер. Аналогичным образом, в работе [5] исследовали взаимодействие противопожарных полос и структуры леса с помощью пространственного моделирования и обнаружили, что правильно расположенные противопожарные полосы могут снизить распространение верхового пожара до 40 % в бореальных лесах.

Помимо противопожарных разрывов, растительные противопожарные барьеры, особенно состоящие из лиственных пород деревьев, привлекают внимание благодаря своей экологичности и противопожарным свойствам. Лиственные деревья, такие как осина (*Populus tremuloides*), береза (*Betula* spp.) и бук (*Fagus sylvatica*), менее пожароопасны благодаря более высокому содержанию влаги в листьях, более широким листьям, более низкой концентрации летучих органических соединений и более разреженной структуре полога [6–8]. Эти физиологические особенности снижают вероятность возгорания и распространения верхового пожара.

Исследования, основанные на анализе экспериментальных данных, подтверждают важную профилактическую роль лиственной растительности. Так, в работе [7] показано, что в смешанных насаждениях с высокой долей осины, лесной пожар распространялся с меньшей интенсивностью по сравнению с чисто хвойными насаждениями. Alexander M.E. и Cruz M.G. [6] отмечали, что присутствие лиственных деревьев может нарушить вертикальную передачу огня и снизить количество энергии, поступающей для поддержания верхового пожара. Анализ данных дистанционного зондирования, проведенный Chuviesco E. и др. [9] продемонстрировал, как лиственные коридоры в средиземноморских лесах, подверженных пожарам, действуют как „пожарные буферы“, снижая как скорость распространения, так и интенсивность пожара.

Исследование эффективности идеализированных противопожарных барьеров (минерализованных полос) с использованием моделирования методом крупных вихрей (LES) представлено в [10]. Проведены симуляции для различных скоростей ветра (2.5 – 12.5 m/s) и ширины барьера (5 – 20 m). Показано, что минимальная ширина противопожарного барьера составляет 15 m независимо от типа топлива и скорости ветра.

В исследовании [11] разработана логистическая регрессия для оценки вероятности преодоления противопожарного барьера огнем. В ходе экспериментальных исследований в саваннах Кот-д'Ивуара установлено, что вероятность перехода огня через барьер превышает критический порог (около 35%) при недостаточной ширине барьера относительно длины пламени. Авторами [11] при расчете ширины противопожарных разрывов предлагается учитывать конкретные условия местности и интенсивность огня. Рекомендуемая авторами ширина барьера составляет от 1.5 до 10 m.

В работе [12] оцениваются стратегии размещения противопожарных полос для снижения риска распространения лесных пожаров в Альберте, Канада. Используются пространственно-временные модели динамики огня и линейное программирование для оптимизации размещения барьеров. Определено оптимальное размещение барьеров вдоль направления ветра для минимизации площади охваченных огнем территорий. Авторы [12] акцентируют внимание на равномерном распределении разрывов по территории и рекомендуют использовать расстояния между ними в пределах нескольких сотен метров. Исследуется влияние ежегодных контролируемых выжиганий на растительность национального парка Золотые Ворота, Южная Африка [13]. Авторы указывают на необходимость установки разрывов шириной от 7 до 50 m.

Более продвинутые модели, такие как разработанные F. Pimont с соавторами [8] и Hoffman C.M. и др. [14], учитывают влагосодержание ЛГМ и трехмерную структуру полога при моделировании поведения пожара. В этих исследованиях сделан вывод о том, что полосы из лиственных пород деревьев могут функционировать

аналогично действию противопожарных разрывов, особенно в условиях умеренного ветра и влажности. Однако авторы также подчеркивают, что такие барьеры наиболее эффективны в сочетании с другими лесохозяйственными мероприятиями.

Размеры противопожарных разрывов зависят от нескольких ключевых параметров:

- метеоусловия, особенно скорость ветра, влияют на распространение огня; чем сильнее ветер, тем шире должен быть разрыв для эффективного препятствия продвижению пожара [15,16];

- структура и состав древесного покрова; наличие лиственных деревьев, обладающих повышенным влагосодержанием, уменьшает вероятность возникновения верхового пожара и снижает необходимую ширину разрыва [17,18];

- топографические особенности местности; сложный рельеф (холмистость, наклон поверхности) увеличивает требуемый размер разрыва [19,20].

Выбор оптимального размера противопожарного разрыва включает комплекс следующих факторов:

- использование метеорологических данных и характеристик местности [21,22];

- учет экологических последствий, а именно сохранение экологической целостности лесного массива путем разумного размещения разрывов [23];

- создание многоуровневой стратегии безопасности с учетом конкретных местных условий, предотвращающей возникновение крупных пожаров и минимизирующей ущерб окружающей среде.

Исследователи подчеркивают, что выбранная ширина разрыва должна соответствовать местным условиям и обеспечивать достаточную защиту против возможного преодоления преграды огнем. В вышеприведенных работах отмечено, что выбор ширины разрыва зависит от конкретной ситуации.

Несмотря на полученные ранее результаты, отдельные модели часто упрощают неоднородность размещения ЛГМ и не способны точно моделировать взаимодействие между верховым пожаром и противопожарными барьерами при различных условиях влажности горючих материалов и ветра. Для устранения этого ограничения необходимы новые подходы к математическому моделированию, учитывающие видоспецифические характеристики горения, влагосодержание ЛГМ и механизмы распространения пожара.

В данном исследовании предлагается математическая модель для оценки эффективности противопожарных разрывов, растительных барьеров из лиственных пород деревьев и их комбинации для замедления или остановки распространения верховых лесных пожаров. Модель учитывает такие переменные, как геометрия барьера, свойства древесных пород, запас и влагосодержание ЛГМ, скорость и направление ветра. В модели также используются термокинетические постоянные процессы сушки, пиролиза и горения для деревьев лиственных

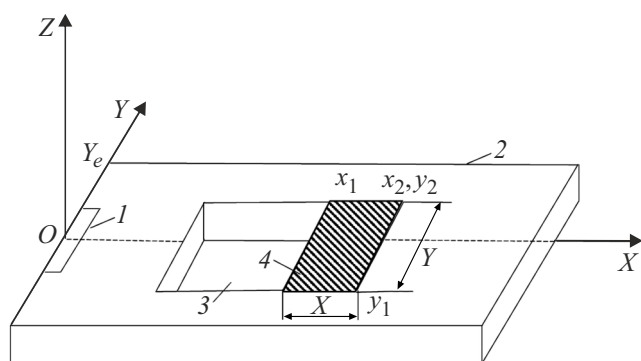


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 — источник зажигания, 2 — хвойный массив леса, 3 — разрыв, 4 — заслон, x_1, x_2, y_1, y_2 — координаты начала и конца заслона вдоль OX и OY соответственно; X и Y — размеры заслона по соответствующим осям.

пород. Интегрируя теоретическое моделирование с данными полевых исследований и литературными данными, настоящая работа направлена на разработку стратегий управления пожарами, сочетающих экологическую устойчивость с эффективным контролем пожаров.

1. Физическая постановка задачи

Задача формулируется следующим образом: имеется источник зажигания конечных размеров, начало трехмерной системы координат XYZ совпадает с центром данного источника. Ось OZ направлена вертикально вверх, горизонтальные оси OX и OY параллельны земной поверхности. Скорость ветра задана вдоль направления оси OX . Под влиянием ветра очаг верхового пожара перемещается по хвойному лесному массиву. На пути распространения пожара располагается противопожарный разрыв конечных размеров, далее следует заслон, состоящий из лиственных деревьев. Схема распространения лесного пожара, расположение разрыва и заслона представлены на рис. 1.

В рамках текущей задачи противопожарные разрыв и заслон из лиственных деревьев имеют конечные размеры и расположены последовательно. Однако взаимное расположение, размеры и геометрия обеих преград может изменяться в зависимости от условий решаемой задачи. В ходе численных экспериментов изучались различные варианты их размещения, а также исследован процесс развития пожара при отсутствии одного из объектов.

2. Математическая постановка задачи

Постановка рассмотренной задачи основана на математической модели, изложенной ранее в [24–26], но в рамках настоящего исследования предлагается обновленная и усовершенствованная версия модели. При

выводе системы искомых уравнений приняты следующие допущения:

- 1) ветер направлен параллельно оси OX ;
- 2) поток характеризуется высокой степенью турбулентности, вследствие чего молекулярный перенос можно считать незначительным по сравнению с турбулентным;
- 3) лесной полог представляет собой неподвижную пористо-дисперсную реагирующую среду;
- 4) среда в пологе леса является двухтемпературной, поскольку различаются температура газовой и конденсированной фаз;
- 5) скорость ветра на левой границе расчетной области является известной величиной;
- 6) в задаче рассматривается вентилируемый лесной массив, где объемная доля конденсированных компонентов (сухое органическое вещество, вода в жидкокапельном состоянии, зола) значительно уступает объему газовой составляющей, содержащей воздух и газообразные продукты пиролиза и горения;
- 7) плотность газовой фазы не зависит от давления, поскольку скорость течения мала по сравнению со скоростью звука;
- 8) для описания процесса переноса энергии излучением используется диффузионное приближение, а для описания конвективного переноса, обусловленного действием силы тяжести, используются уравнения Рэйнольдса.

Учитывая, что вертикальные размеры лесного массива несопоставимо меньше его горизонтальных размеров, общая система дифференциальных уравнений процесса тепломассопереноса в трехмерном массиве может быть приведена к дивергентному виду, а затем проинтегрирована по высоте полога леса h . Кроме того будем считать

$$\int_0^h \phi dz = \bar{\phi}h, \quad (1)$$

где $\bar{\phi}$ — среднее значение величины ϕ .

Проинтегрированная система уравнений выглядит следующим образом (формулы (2)–(12)):

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s), \quad (8)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = 0, \quad (9)$$

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

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

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

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

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

$$R_2 = k_2 T_s^{-0.5} \rho_2 \varphi_2, \quad (14)$$

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

$$R_5 = k_5 M_2 (c_1 M / M_1)^{0.25} (c_2 M / M_2) T^{-2.25} \exp \left(-\frac{E_5}{RT} \right). \quad (16)$$

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

$$t = 0 : u = 0; \quad v = 0; \quad T = T_e; \quad c_\alpha = c_{ae}; \quad T_s = T_e; \quad \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (17)$$

$$x = 0 : u = V_e; \quad v = 0; \quad T = T_e; \quad c_\alpha = c_{ae};$$

$$\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (18)$$

$$x = x_e : \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (19)$$

$$y = -\frac{y_e}{2} : \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (20)$$

$$y = \frac{y_e}{2} : \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0. \quad (21)$$

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

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

Здесь t_0 — время формирования очага, после чего очаг зажигания „отключается“; k_0 — коэффициент затухания очага. Температура изменяется при $t > t_0$ от $T_0 = 1000$ К до значения $T_e = 300$ К.

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:

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

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

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 — температуры 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 полого леса; 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 [26]. Символом $\frac{d}{dt}$ 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 лесного горючего материала (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;

$\varphi_s = \sum_{i=1}^4 \varphi_i$, r_s — радиус цилиндра (типичный элемент ЛГМ) [25].

Компоненты тензора турбулентных напряжений, турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты среднего течения согласно [26].

$$\begin{aligned} \overline{\rho u'^2} &= 2\mu_t \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}K, \quad \overline{\rho v'^2} = 2\mu_t \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}K, \\ -\overline{\rho u'v'} &= \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \mu_t &= \frac{c_\mu \rho K^2}{\varepsilon}, \quad -\overline{\rho u'c_p T'} = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \lambda_t = \mu_t c_p / Pr_t, \\ -\overline{\rho v'c_p T'} &= \lambda_t \frac{\partial T}{\partial y}, \\ -\overline{\rho u'c'_\alpha} &= \rho D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x}, \quad \rho D_t = \mu_t / Sc_t, \quad -\overline{\rho v'c'_\alpha} = D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial y}. \end{aligned} \quad (25)$$

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 [26]:

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

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 [26].

Термокинетические, теплофизические и структурные характеристики лесного массива соответствуют ЛГМ соснового леса: $E_1/R = 9400$ К, $k_1 = 3.63 \cdot 10^4$ с⁻¹, $E_2/R = 6000$ К, $k_2 = 6 \cdot 10^5$ с⁻¹, $q_2 = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $E_3/R = 10\,000$ К, $k_3 = 10^3$ с⁻¹, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $E_5/R = 11\,500$ К, $k_5 = 3 \cdot 10^{13}$ с⁻¹, $q_5 = 10^7$ Дж/кг, $c_p = 1000$ Дж/(кг·К), $\alpha_c = 0.06$, $v_c = 0.7$, $\rho_e = 1.2$ кг/м³, $c + 2e = 0$, $p_e = 10^5$ Н/м², $T_e = 300$ К, $c_{1e} = 0.23$ [26].

3. Метод решения

Для решения рассматриваемой системы дифференциальных уравнений применяется метод контрольных объемов [27]. Расчетная область разделяется на ряд непересекающихся контрольных объемов, каждый из которых связан с отдельной узловой точкой. Вычисленные значения будут актуальны для всего контрольного объема. Затем производится интегрирование исходной системы уравнений отдельно для каждого такого объема. Полученная нелинейная система алгебраических уравнений решалась численно с помощью метода SIP [27].

Для оценки точности применяемых разностных схем и проверки правильности работы программы использовался метод априори задаваемых аналитических решений. В базовые уравнения заранее вводились аналитически заданные формы искоемых функций, рассчитывалась невязка уравнений, рассматриваемая как фиктивный источник в каждом уравнении. Затем производилось восстановление значений функций, при этом уровень точности восстановления составлял не менее 0.5 %. Устойчивость и адекватность найденных решений дополнительно оценивались путем уменьшения временных и пространственных интервалов. В серийных расчетах применялся алгоритм автоматического подбора шага по времени.

4. Результаты численных расчетов и их анализ

На основании приведенной математической модели проведены численные эксперименты по расчету оптимальных размеров противопожарных разрывов и заслонов из деревьев лиственных пород, а также исследована эффективность их комбинации. Изменяемыми параметрами в ходе моделирования являлись:

- влагосодержание ЛГМ;
- запас ЛГМ;
- скорость ветра в невозмущенной среде;
- влагосодержание лиственных деревьев, формирующих противопожарный заслон;
- размеры и конфигурация противопожарных разрывов и заслонов.

Таблица 1. Размеры противопожарного заслона в зависимости от влагосодержания листового ЛГМ

Размерные характеристики заслона								
W заслона	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
x_1 , m	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
x_2 , m	48.0	48.0	45.0	44.0	43.0	42.0	41.0	41.0
y_1 , m	1.0	15.5	20.0	21.0	22.5	23.0	23.5	23.5
y_2 , m	49.0	34.5	30.0	26.0	26.5	27.0	26.5	26.5
Площадные характеристики заслона								
W заслона	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
X, m	8.0	8.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0
Y, m	48.0	19.0	10.0	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0
S, m ²	768.0	304.0	100.0	40.0	24.0	16.0	6.0	6.0

Примечание. x_1 , x_2 , y_1 , y_2 — координаты начала и конца заслона в направлении OX и OY соответственно; X и Y — размеры заслона по соответствующим осям; S — площадь заслона.

Влагосодержание ЛГМ является безразмерной величиной и определяется по формуле: $W = \frac{(m-m_0)}{m_0}$, где m — масса ЛГМ в естественном состоянии, m_0 — масса ЛГМ в абсолютно сухом состоянии.

Начальная граница противопожарных разрывов и заслонов была установлена на расстоянии 40 м от источника зажигания. На указанном расстоянии скорость распространения пожара стабилизируется, что позволяет получать устойчивые и предсказуемые результаты. Благодаря этому условию проведенные расчеты обладают достаточной точностью и достоверностью.

В ходе численных расчетов получены распределения изотерм, концентраций кислорода и продуктов пиролиза в различные моменты времени. В табл. 1 показаны результаты расчетов размерных и площадных характеристик противопожарного заслона в зависимости от влагосодержания (W) листового ЛГМ.

Численные расчеты проведены при следующих условиях: запас ЛГМ хвойного леса принят 0.2 kg/m^3 , влагосодержание ЛГМ хвойного леса равно 0.66, скорость ветра в невозмущенной среде равна 5 м/с. Влагосодержание заслона листового ЛГМ изменяли от 0.8 до 1.5. Вне указанного диапазона лесной пожар имеет два сценария развития: либо продолжает распространение вне зависимости от размеров заслона, либо прекращает распространение.

Значения координат, представленные в табл. 1, демонстрируют уменьшение размера заслона, способного остановить горение при повышении влагосодержания ЛГМ листового массива: от 8 м при влагосодержании заслона 0.8 до 1 м при влагосодержании 1.5. Аналогичная ситуация наблюдается и по оси OY. Площадь заслона также резко сокращается с увеличением влагосодержания от 770 до 6 м².

На рис. 2 представлена зависимость размеров площади противопожарного заслона из листовых пород деревьев от влагосодержания листовых ЛГМ.

На рис. 2 показано, что ЛГМ с более высоким влагосодержанием менее подвержен возгоранию, поэтому для остановки пожара требуется меньшая площадь заслона. Согласно данным табл. 1, наблюдается также следующая взаимосвязь: с увеличением влагосодержания меняются линейные размеры заслона по направлениям X и Y аналогичным образом.

Проанализировано влияние скорости ветра на оптимальные размеры противопожарного заслона при прочих постоянных характеристиках: запас ЛГМ в хвойном массиве 0.3 kg/m^3 , влагосодержание хвойного массива 0.66, влагосодержание ЛГМ листового участка 1.0. Результаты проведенных расчетов приводятся в табл. 2 и отображены на рис. 3.

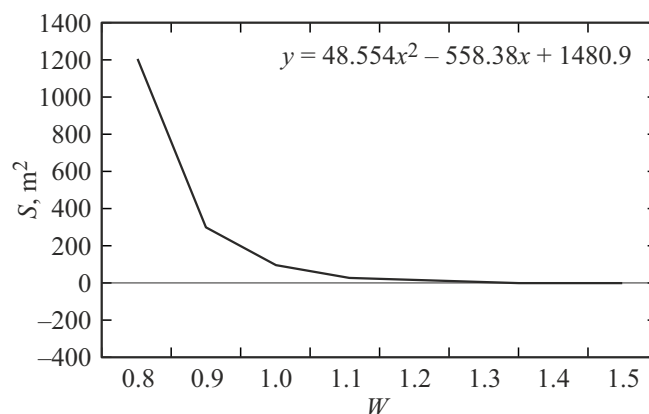
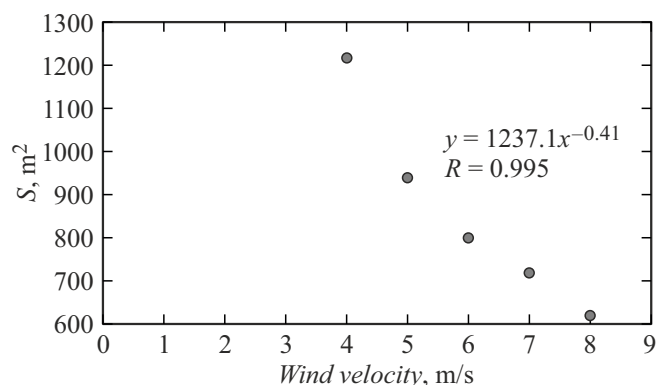
**Рис. 2.** Зависимость размеров площади противопожарного заслона листовых пород деревьев от влагосодержания листового ЛГМ.

Таблица 2. Зависимость размеров заслона лиственных деревьев от скорости ветра

Размерные характеристики заслона					
Скорость ветра, m/s	4	5	6	7	8
x_1 , m	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
x_2 , m	47.0	47.5	49.0	50.0	52.0
y_1 , m	3.0	9.5	14.0	16.0	18.5
y_2 , m	47.0	40.5	36.0	34.0	31.5
Площадные характеристики заслона					
X , m	7.0	7.5	9.0	10.0	12.0
Y , m	44.0	31.0	22.0	18.0	13.0
S , m ²	616.0	465.0	396.0	360.0	312.0

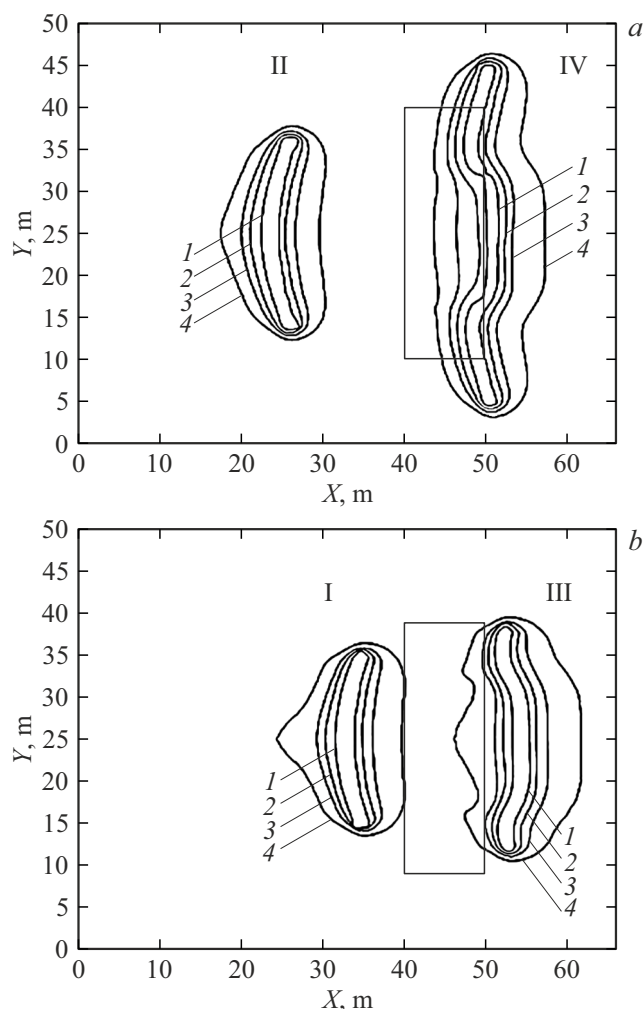
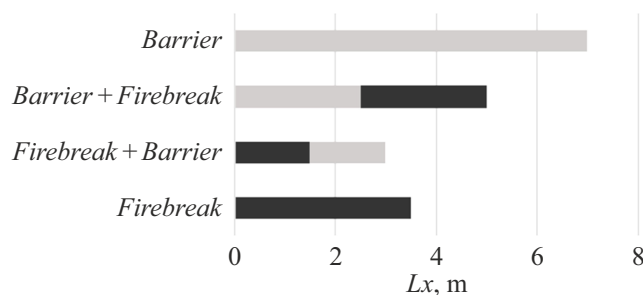
Примечание. x_1 , x_2 , y_1 , y_2 — координаты начала и конца заслона в направлении OX и OY соответственно; X и Y — размеры заслона по соответствующим осям; S — площадь заслона.

**Рис. 3.** Зависимость площади противопожарного заслона от скорости ветра.

Полученный график (рис. 3) показывает, что с увеличением скорости ветра площадь заслона изменяется нелинейно, причем наибольшее сокращение отмечается именно по направлению оси OY . Данное явление легко проследить, сравнивая распределение изотерм на линии фронта пожара перед разрывом при скоростях ветра 4 m/s (рис. 4, а) и 8 m/s (рис. 4, б). Получены распределения изотерм газовой фазы 1 — $\bar{T} = 5$, 2 — $\bar{T} = 3$, 3 — $\bar{T} = 2$, 4 — $\bar{T} = 1.3$), определяющиеся как $\bar{T} = T/T_e$, где $T_e = 300$ K.

Далее проведено сравнение эффективности противопожарных преград различных типов: разрывы, заслоны, а также сочетания разрыв + заслон и заслон + разрыв. На рис. 5–7 представлены результаты численных расчетов оптимальных размеров противопожарных разрывов и заслонов, способных остановить распространение верхового лесного пожара.

Анализ полученных результатов (рис. 5–7) выявил следующую тенденцию: противопожарный заслон показал самую низкую эффективность среди всех преград, а противопожарный разрыв — самую высокую. Преграда разрыв + заслон также оказалась эффективной. Причина

**Рис. 4.** Распределение изотерм во фронте пожара до и после разрыва при скорости ветра 4 (а) и 8 m/s (б) в моменты времени: I — 5, II — 6, III — 13, IV — 16 с.**Рис. 5.** Сравнение оптимальных размеров противопожарных заслонов и разрывов (запас ЛГМ 0.5 kg/m³, влагосодержание хвойного леса 0.66, скорость ветра 7 m/s, влагосодержание заслона 1.0).

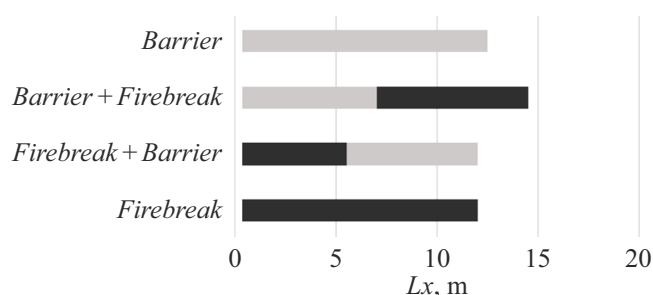


Рис. 6. Сравнение оптимальных размеров противопожарных заслонов и разрывов (запас ЛГМ 0.66 kg/m^3 , влагосодержание хвойного леса 0.2, скорость ветра 7 m/s , влагосодержание заслона 1.0).

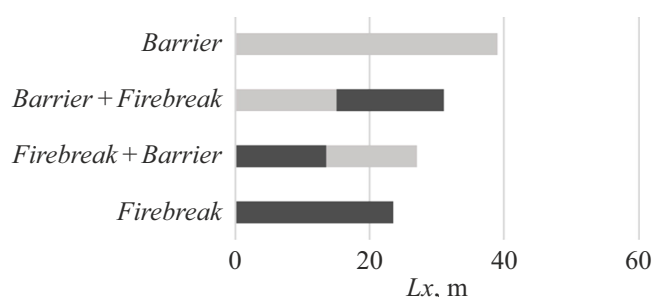


Рис. 7. Сравнение оптимальных размеров противопожарных разрывов и заслонов (запас ЛГМ 0.2 kg/m^3 , влагосодержание хвойного леса 0.2, скорость ветра 7 m/s , влагосодержание заслона 1.0).

этого заключается в снижении интенсивности конвективного теплового потока и излучения, проходящего через разрыв, свободный от ЛГМ. Когда тепловая энергия достигает полосы с листовым ЛГМ, ее количества недостаточно для зажигания ЛГМ, особенно листовых пород, имеющих повышенное влагосодержание.

Комбинированный подход (разрыв + заслон) является эффективным и перспективным видом противопожарной преграды. Данное сочетание подходит для защиты лесов, населенных пунктов, а также промышленных зон. „Разрыв + заслон“ является экологичным барьером и экономичен в изготовлении; ширину разрыва и заслона можно адаптировать под конкретные условия (тип пожара, рельеф местности, наличие и характеристики горючих материалов).

Полученные в настоящей работе результаты по расчету требуемых размеров противопожарных разрывов и заслонов подтверждаются рядом экспериментальных и модельных исследований.

Выявленная авторами сильная зависимость ширины разрыва от влагосодержания топлива согласуется с лабораторными и численными данными. Так, в эксперименте [28] показано, что при высоком влагосодержании даже небольшие промежутки ($0.1 - 0.35 \text{ m}$ на лабораторном масштабе) препятствуют распространению огня. Аналогично, модельные работы [29,30] демонстрируют

пороговое поведение: рост влажности резко снижает вероятность перехода огня через барьер. В настоящей работе этот эффект выражен в виде уменьшения ширины X от 8 до 1 m при увеличении влагосодержания ЛГМ от 0.8 до 1.5 , что полностью согласуется с указанной тенденцией.

Расчетное увеличение требуемой ширины преграды при росте скорости ветра также подтверждается независимыми источниками. В частности, в табл. 2 авторы приводят значения $X \approx 7 - 12 \text{ m}$ при скорости ветра $4 - 8 \text{ m/s}$. Численные исследования [30] показали аналогичный диапазон эффективных разрывов ($5 - 20 \text{ m}$) при тех же скоростях ветра. Таким образом, количественные оценки в настоящей работе находятся в пределах опубликованных модельных данных.

Проведенные ранее полевые эксперименты на травянистых топливах [31] показали, что при умеренных скоростях ветра огонь останавливался разрывами шириной $1.5 - 15 \text{ m}$. Это сопоставимо с диапазоном $1 - 12 \text{ m}$, полученным авторами, и подтверждает правильность расчетов для условий невысокой интенсивности.

Вывод о целесообразности сочетания минерализованного разрыва с листовым заслоном подтверждается практикой применения „green fuel breaks“ [32], которая доказала эффективность в снижении интенсивности и ущерба от пожаров. Данный подход позволяет уменьшить требуемую площадь земли без потери эффективности, что также показано в расчетах.

Полученные результаты подтверждают важность комплексного подхода к организации противопожарной защиты лесных массивов, учитывающего множество взаимосвязанных факторов.

Достоверность результатов исследования также подтверждается следующими показателями:

1. Использование апробированной и ранее проверенной математической модели, основанной на системе уравнений тепломассопереноса, с учетом турбулентности и излучения [24–26].

2. Корректность реализации проверялась методом априори задаваемых аналитических решений: невязки вводились как фиктивные источники, восстановление искомым функциям обеспечивало среднюю погрешность не хуже 0.5% . Дополнительно проведены расчеты с усилением пространственно-временного разрешения (grid/time-refinement) для контроля инвариантности решения.

3. Результаты численного моделирования подтверждены и согласуются с нормативными требованиями [33], рекомендующими ширину барьеров от 50 до 150 m в зависимости от условий.

На основе сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными и результатами математического моделирования других авторов можно отметить:

1. Нормативно-экспериментальные оценки указывают на необходимость ширины барьеров порядка $100 - 150 \text{ m}$ для верховых пожаров или при ветре свыше

10 m/s; для умеренных условий достаточно 50 – 70 m. Расчеты авторов настоящей работы, фиксирующие преимущество разрывов и требование увеличения размеров при усилении ветра, согласуются с указанными диапазонами.

2. Роль лиственных пород. Лабораторные и полевые исследования показывают более высокую температуру воспламенения и высокое влагосодержание лиственного ЛГМ (в 1.5 – 2 раза выше температуры воспламенения по сравнению с хвойными), а также эффективность сомкнутых лиственных насаждений как барьеров. Полученная авторами в настоящей работе сильная зависимость требуемой площади заслона от влагосодержания ЛГМ качественно подтверждает эти выводы.

3. Пространственные модели (например, FARSITE [3]) и работы по сетям противопожарных полос [4,5] демонстрируют целесообразность объединения „разрыв + заслон“ и показанное сокращение изымаемой земли на 30 %.

4. Согласованность с современными подходами к снижению горючести. Результаты коррелируют с принципами топливopонижающих мероприятий [2], работами по влиянию влагосодержания на интенсификацию/сдерживание горения [8], а также с данными о „буферных“ функциях лиственных коридоров по материалам дистанционного зондирования.

Заключение

В работе выполнено численное исследование эффективности противопожарных разрывов и заслонов из деревьев лиственных пород, а также их совместного использования для предотвращения распространения верховых лесных пожаров. В результате литературного обзора не найдено работ, реализующих подобный подход в данной постановке. Математическая модель основана на системе осредненных по высоте полога леса уравнений тепломассопереноса в пористо-дисперсной реагирующей среде с учетом турбулентного переноса, пиролиза и фазовых превращений; дискретный аналог получен методом контрольного объема, а расчеты проведены итерационно методом SIP с использованием алгоритма SIMPLE. Это позволило исследовать влияние скорости ветра, запаса и влагосодержания ЛГМ, геометрии и взаимного расположения преград.

Проведенное численное исследование позволило установить оптимальные параметры противопожарных разрывов и заслонов для борьбы с верховыми лесными пожарами. Основными результатами исследования являются:

1. Выявлена эффективность противопожарных разрывов и заслонов из лиственных деревьев при различных условиях окружающей среды: запаса ЛГМ, скорости ветра и влагосодержании.

2. Наибольшей эффективностью в предотвращении распространения верхового пожара обладают противопо-

жарные разрывы, особенно при комбинации с заслонами из лиственных пород деревьев.

3. Комбинированное применение разрывов и заслонов снижает площадь неиспользуемых земель на 30 %, что делает данный подход наиболее перспективным.

4. Установлена существенная зависимость размера противопожарных заслонов от влагосодержания ЛГМ и скорости ветра. При увеличении влагосодержания и скорости ветра требуемая площадь заслона значительно сокращается.

Следует также отметить на ограничения модели и область применимости. Модель предполагает: стационарно заданное направление и скорость ветра, вентилируемую лесную среду с преобладанием газовой фазы, диффузионное приближение для излучения, отсутствие переноса горящих частиц и осреднение системы уравнений по высоте полога (2D-постановка в плане). Эти допущения типичны для задач оперативной оценки эффективности противопожарных барьеров, но требуют осторожности при переносе выводов на сложный рельеф, нестационарную метеодинамику, выраженную 3D-структурность полога и наличие дополнительных источников/вспышек. В будущих работах целесообразны расчеты с нестационарным ветром, вариативной сомкнутостью крон и детализированным учетом изменения запаса и влагосодержания ЛГМ по пространству и по фракциям, а также с учетом переноса горящих частиц.

Таким образом, представленные результаты исследования находятся в согласии с экспериментальными данными [28,31], численными исследованиями [29,30] и современными практическими подходами [32]. Следовательно, обладают достаточной степенью достоверности и могут быть рекомендованы для практического применения и разработки рекомендаций по организации противопожарной защиты лесных территорий.

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] B.S. Lee, M.E. Alexander, B.C. Hawkes. *Canad. J. Forest Res.*, **36** (11), 2961 (2006).
- [2] D. Ascoli, L. Russo, F. Giannino, C. Siettos, F. Moreira. *Firebreak and Fuelbreak. Encyclopedia of Wildfire and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Springer, 2018)
- [3] M.A. Finney. *Forest Sci.*, **47** (2), 219 (2001).
- [4] W.R. Catchpole, R.A. Bradstock, J. Choate, L.G. Fogarty, N.J.H. Gellie, G.J. McCarthy, L.J. Wright. *Cooperative development of equations for heathland fire behavior*. In *Proceedings of the III Intern. Conf. Forest Fire Res.*, 631 (1998).

- [5] B.R. Sturtevant, D.T. Cleland, T.R. Crow, S.M. Lietz. *Restoration Ecology*, **12** (1), 52 (2004).
- [6] M.E. Alexander, M.G. Cruz. *Environmental Modelling and Software*, **41**, 65 (2013).
- [7] L.N. Kobziar, D.R. Godwin, L. Taylor, A.C. Watts. *Forests*, **6** (3), 561 (2015).
- [8] F. Pimont, J.L. Dupuy, R.R. Linn, S. Dupont. *Intern. J. Wildland Fire*, **28** (6), 494 (2019).
- [9] E. Chuvieco, I. Aguado, M. Yebra. *Ecological Modelling*, **221** (1), 46 (2014).
- [10] N. Khan, K. Moinuddin. *Atmosphere*, **12** (11), 1395 (2021). <https://doi.org/10.3390/atmos12111395>
- [11] A.D.V. Brou, T.D. Soro, K.K.S. Yanga. *Comptes Rendus Mécanique*, **353**, 673 (2025).
- [12] D. Yemshanov, N. Liu, E.W. Neilson, F.H. Koch, M.-A. Parisien. *Evaluating Fuelbreak Strategies for Compartmentalizing a Fire-Prone Forest Landscape in Alberta Canada* (PLoS ONE, **20** (5), (2025)), DOI: 10.1371/journal.pone.0321722
- [13] A.C. van Aardt, J.C.L. de Jager, J.J. van Tol. *Diversity*, **16** (7), 373 (2024). DOI: 10.3390/d16070373
- [14] C.M. Hoffman, J. Ziegler, J. Canfield, R.R. Linn, W. Mell. *Fire Technol.*, **52** (1), 221 (2016).
- [15] V.A. Perminov. *Numerical Solution of the Crown Forest Fires Spread Taking into Account Fire Barriers and Breaks. Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science*. In Proceedings of International Conference „Modern Technologies for Non-Destructive Testing“, **433**, 155 (2023).
- [16] B.M. Gannon, Y. Wei, E.J. Belval, J. Young, M. Thompson, Ch. O'Connor, D. Calkin, Ch. Dunn. *Scientific J*, **6** (3), 104 (2023). <https://doi.org/10.3390/fire6030104>
- [17] M. Ortega, F. Rodriguez y Silva, J.R. Molina. *Fire Ecology*, **20**, 40 (2024).
- [18] S.M. Hayajneh, J. Naser. *Fire*, **8** (6), 217 (2025). <https://doi.org/10.3390/fire8060217>
- [19] J. Park, M. Moon, T. Green, M. Kang, S. Cho, J. Lim, S.-J. Kim. *Forest Ecology Management*, **572**, 122279 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122279>
- [20] M.P. Harris, J.D. Coop, J.A. Balik, J.R. McFarland, S.A. Parks, C.S. Stevens-Rumann. *Ecological Applications*, **35** (5), e70061 (2025). <https://doi.org/10.1002/eap.70061>
- [21] H. Zhuang, N. Liu, X. Xie, X. Xu, M. Li, Y. Zhang, R. Wang. *Intern. J. Wildland Fire*, **34** (1), 1 (2025).
- [22] K. Kwon, S. Kim, S. Lee, et.al. *J. Korean Social Hazard Mitigation*, **21** (4), 31 (2021).
- [23] A.L. Atchley, C.M. Hoffman, S.R. Bonner, S.M. Ritter, J. O'Brien, R.R. Linn. *Fire Ecology*, **20**, 71 (2024). <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00291-x>
- [24] А.М. Гришин, А.Д. Грузин, В.Г. Зверев. *Теплофизика лесных пожаров*, **38** (1985).
- [25] В. Перминов. *Математическое моделирование лесных пожаров. Возникновение верховых и массовых лесных пожаров* (Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011), 288 с.
- [26] А.М. Гришин. *Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними* (Наука, Новосибирск, 1992), 404 с.
- [27] S.V. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow* (Hemisphere Publishing Corporation, NY., 1980), 197 p.
- [28] H. Guo, Z. Wang, Y. Wang, et. al. *Forests*, **14** (6), 1176 (2023).
- [29] C. Awad, A. Lamorlette, Z. Younsi. *Intern. J. Wildland Fire*, **29** (9), 774 (2020).
- [30] D. Morvan. *Fire Safety J.*, **71**, 34 (2015).
- [31] A.A.G. Wilson. *Intern. J. Wildland Fire*, **1** (1), 35 (1988).
- [32] J.A. Baijnath-Rodino, B.M. Collins, C.L. Tubbesing, et.al. *Forest Ecology and Management*, **532**, 120748 (2023).
- [33] *Нефтепродуктопроводы, прокладываемые на территории городов и других населенных пунктов*. СНиП 2.05.13–90 (Госстрой СССР, М., 1990), 19 с.