

Математическое моделирование процессов инертного прогрева и пиролиза элемента лесного горючего материала при воздействии фронта лесного пожара с учетом процесса образования сажи

Николай Викторович Барановский ✉, Виктория Андреевна Вяткина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Во время лесного пожара в атмосферу выделяется большое количество загрязняющих веществ, в том числе и углеродистые частицы сажи. Повышенное содержание этих частиц в воздухе может привести к развитию у людей кардиореспираторных заболеваний или к летальному исходу. Замечено, что определенное количество сажевых частиц продуцируется на стадии пиролиза лесного горючего материала. В связи с этим целесообразно изучать закономерности процессов пиролиза и сажеобразования для разработки эффективных методов их прогнозирования и предотвращения.

Цель работы. Целью данного исследования является математическое моделирование теплопереноса в элементе типичного лесного горючего материала (лист березы) с учетом термического разложения сухого органического вещества и образования сажевых частиц.

Материалы и методы. В рамках работы проведено сценарное моделирование процессов теплопереноса в образце лесного горючего материала (листа березы), находящегося под воздействием высокотемпературной среды. При численном моделировании решались одномерное уравнение теплопроводности и кинетическое уравнение с соответствующими начальными и граничными условиями. Полученная система дифференциальных уравнений решалась методом конечных разностей. Реализация вычислений осуществлялась с помощью программного пакета RAD Studio. Обработка графических результатов проводилась с помощью программного пакета OriginPro.

Результаты. При сценарном моделировании был учтен тип лесного пожара, период пожароопасного сезона, свойства лесного горючего материала, степень диспергирования лесного горючего материала, начальное влагосодержание элемента лесного горючего материала. Выявлено, что основное влияние оказывает степень диспергирования и вид лесного пожара. Также установлено подобие качественных характеристик процесса сажеобразования для всех видов лесных пожаров.

Выводы. Предложенная математическая модель может быть использована совместно с геоинформационными системами для визуализации исходной и выходной информации при оценке, мониторинге и прогнозировании лесных пожаров и их экологических последствий.

Ключевые слова: прогнозирование лесной пожарной опасности; лист березы; сухое органическое вещество; температурное распределение; распределение фаз; кинетическая модель пиролиза; метод конечных разностей

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-31-51001.

Для цитирования: Барановский Н.В., Вяткина В.А. Математическое моделирование процессов инертного прогрева и пиролиза элемента лесного горючего материала при воздействии фронта лесного пожара с учетом процесса образования сажи // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 34–44. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.34-44

✉ Барановский Николай Викторович, e-mail: firedanger@yandex.ru

Mathematical simulation of inert heating and pyrolysis of forest fuel under the influence of a forest fire front, if the process of sooting is taken into account

Nikolay V. Baranovskiy ✉, Viktoriya A. Vyatkina

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Large amounts of pollutants, including carbonaceous particles of soot, are released into the atmosphere during a forest fire. High concentrations of these particles in the air can lead to the development of

cardiorespiratory diseases or death. It has been noticed that a certain number of soot particles is produced at the stage of forest fuel pyrolysis. In this regard, it is advisable to study the processes of pyrolysis and sooting to develop effective methods of their prediction and prevention.

Goal of the study. The goal of this study is the mathematical simulation of heat transfer in an element of standard forest fuel (a birch leaf), taking into account the thermal decomposition of dry organic matter and sooting.

Materials and methods. Within the framework of the work, scenario modeling of heat and mass transfer processes in an element of forest fuel (a birch leaf), subjected to the influence of a high-temperature environment, was conducted. A one-dimensional heat transfer equation and a kinetic equation, having respective initial and boundary conditions, were solved by means of numerical simulation. The finite difference method was employed to solve the resulting system of differential equations. The calculations were conducted using the RAD Studio software package. Graphical results were processed using the OriginPro software package.

Results. Scenario modeling took into account the type of forest fire, the period of the fire hazard season, forest fuel properties, the degree of the forest fuel dispersion, and the initial moisture content in a forest fuel element. The authors have found that the major influence is made by the extent of dispersion and the type of forest fire. The similarity of qualitative characteristics of sooting has also been established for all types of forest fires.

Conclusion. The proposed mathematical model can be used in conjunction with geoinformation systems to visualize the initial and output information in the process of assessment, monitoring and forecasting of forest fires and their environmental consequences.

Keywords: forest fire danger prediction; birch leaf; dry organic matter; temperature distribution; phase distribution; kinetic model of pyrolysis; finite difference method

The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success", project No. 20-31-51001.

For citation: Baranovskiy N.V., Vyatkina V.A. Mathematical simulation of inert heating and pyrolysis of forest fuel under the influence of a forest fire front, if the process of sooting is taken into account. *Pozharovzryvobezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):34-44. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.34-44 (rus).

✉ Nikolay Viktorovich Baranovskiy, e-mail: firedanger@yandex.ru

Введение

Лесные пожары оказывают существенное влияние на состояние здоровья людей, находящихся на лесопокрытых и населенных территориях [1, 2]. Во время лесного пожара в атмосферу выделяется большое количество загрязняющих веществ, в том числе и углеродистые частицы сажи [3, 4]. В результате атмосферного переноса частицы сажи могут оказаться в воздухе, которым дышат люди [5]. Лесной пожар является многостадийным процессом [6], включающим такие этапы, как инертный прогрев лесного горючего материала, испарение влаги, термическое разложение сухого органического вещества, пламенное горение газообразных продуктов пиролиза и догорание коксового остатка. Уже на стадии пиролиза продуцируется определенное количество сажевых частиц [7]. Выделяются различные сценарии воздействия загрязненного воздуха на людей, например, нахождение людей в окрестностях активного лесного пожара или на территории промышленных объектов, расположенных в лесу. Однако где бы ни находились люди, дымовые или сажевые частицы оказывают воздействие, которое может привести к развитию кардиореспираторных заболеваний [8], а также к смертельному исходу [9]. Следовательно, необходимо изучить особенности как процесса сажеобразования, так и процессов непосредственно ему предшествующих.

Под процессом пиролиза понимают процесс термохимического разложения, при котором органический материал (биомасса) превращается

в твердое вещество с высоким содержанием углерода и летучее вещество при нагревании в отсутствие кислорода [10]. При лесных пожарах подразумевают окислительный пиролиз.

В настоящее время выделяется несколько подходов к моделированию процесса пиролиза биомассы. Для лучшего понимания механизмов пиролиза моделирование этого процесса ведется в рамках трех групп: механистических, сетевых и кинетических моделей [11]. В контексте изучения особенностей лесных пожаров целесообразно использовать кинетические модели, поскольку в данном случае не требуется большого количества структурных данных, и они могут быть получены экспериментально. Также данный подход достаточно простой и обеспечивает хорошую сходимость результатов.

Простейшим примером кинетических моделей является одноступенчатая глобальная кинетическая модель [12]. В рамках этой модели рассматривается одностадийная реакция преобразования биомассы в полукокк и летучие вещества. Такая модель основана на реакции Аррениуса [13]:

$$\frac{dV}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(V_{\infty} - V), \quad (1)$$

где t — время;

V — нормированная масса летучих веществ.

A и E — кинетические коэффициенты Аррениуса;

R — постоянная Аррениуса;

T — температура частицы;

V_{∞} — конечное значение V ;

Кинетические модели могут быть классифицированы на сосредоточенные (lumped) и распределенные (distributed) в зависимости от механизма реакции. В сосредоточенных моделях компоненты биомассы и продукты реакции разложения объединяются в три больших класса продуктов: газ, смола и коксовый остаток. Однако существует несколько механизмов первичных и вторичных реакций с образованием летучих веществ [14]. Концепция распределенных моделей предполагает образование продуктов пиролиза путем бесконечного числа независимых параллельных реакций. Все эти реакции имеют различные энергии активации, которые могут быть заданы различными функциями распределения [14, 15]. Основной задачей при моделировании процесса пиролиза является анализ динамики изменения фаз и также времени индукции образца.

Формирование сажи (дыма) в пламени обусловлено одновременным протеканием таких процессов как фрагментация углеродсодержащих продуктов разложения топлива, зарождения центров нуклеации части, роста частиц за счет осаждения на их поверхности газовых компонентов, а также столкновения и коагуляции частиц и гетерогенного окисления частиц. Наиболее активно процесс зарождения и поверхностный рост частиц сажи протекает в высокотемпературной зоне пламени [16]. Массовая доля аэрозольной эмиссии варьируется в диапазоне от 1–2 до 5–7 % от количества сгоревшей биомассы и определяется условиями горения [17]. Состав образовавшихся продуктов горения зависит от температуры и давления горения, а также от массовой доли химических элементов, из которых состоит ЛГМ. Соотношение массы твердых частиц дымового аэрозоля к массе сгоревшего лесного материала варьируется в зависимости от характеристик пожара. По некоторым экспериментальным данным при сгорании одной тонны лесных горючих материалов в атмосферу поступает около 24 кг твердых частиц [18]. Аэрозольная дымовая эмиссия включает в себя три типа химических веществ [17]:

- вещества минерально-почвенного происхождения (3–15 % от полной массы дымовой эмиссии) в виде химических окислов и солей таких элементов, как кальций, кремний, железо, цинк, алюминий и др., входящих в состав частичек почвы (пыли), поднятых в воздух восходящими потоками горячего дыма;
- органические вещества, характерные для химического состава горячей растительности (60–80 % от полной массы дымовой эмиссии), обычно это термически разложившаяся целлюлоза, древесные смолы, лигнины;
- элементный углерод (7–15 % от полной массы дымовой эмиссии) как результат обугливания

в частицах органического растительного материала и конденсированных продуктов его термической деструкции.

Проведенные исследования показывают, что размер частиц и их распределение в пространстве зависит от типа топлива, среды горения, условий горения, технологий измерения. Быстрое увеличение размера частиц происходит сразу после выброса частиц дыма. Пылающий огонь выделяет относительно больше частиц сажи, чем тлеющие огни [19]. Также ряд работ посвящен определению химического состава образовавшихся аэрозолей [20, 21]. Также установлено, что коэффициент выбросов определяется видом лесного горючего материала. Для большинства загрязняющих веществ в результате сжигания коры выделяется больше выбросов, чем при сжигании листьев и веток [22].

Таким образом, становится понятно, что стадия пиролиза влечет за собой начало образования сажевых частиц и дальнейшее загорание образца. Необходимо изучать закономерности этих процессов для разработки эффективных методов их прогнозирования и предотвращения. Целью данного исследования является математическое моделирование теплопереноса в элементе типичного лесного горючего материала (лист березы) с учетом термического разложения сухого органического вещества и образования сажевых частиц.

Физико-математическая постановка задачи

В качестве объекта исследования был выбран элемент лесного горючего материала — лист березы повислой. Выбор обусловлен широким ареалом распространения этого вида в различных регионах планеты (Россия, Европа, Центральная Азия, регионы Африки и Пиренейского полуострова) [23]. Стоит отметить, что данный вид часто произрастает в смешанных лесах, состоящих из других хвойных и лиственных пород, закономерности процесса загорания которых могут существенно отличаться. Значит, образец листа березы данного вида может стать причиной возможного лесного пожара.

Экспериментальные исследования по определению времени задержки загорания листа березы позволили выявить физико-химический механизм загорания данного лесного горючего материала. Сначала имеет место инертный прогрев образца, далее начинается процесс пиролиза сухого органического вещества, сопровождаемый выделением в атмосферу газообразных продуктов реакции разложения, а также сажевых частиц. Выделившиеся продукты смешиваются с кислородом воздуха в пристенной области листа, что вызывает воспламенение образца в газовой фазе. Разработанная математическая модель призвана повторить процессы инертного про-

грева, пиролиза и образования сажи для получения и оценки количественных и качественных характеристик тепломассопереноса [24].

В рамках математического моделирования предполагалось, что лист березы попадает во фронт лесного пожара (высокотемпературную среду), его поверхности прогреваются, далее начинается процесс пиролиза, сопровождающийся выделением газообразных продуктов и частиц сажи. Испарение влаги из образца не учитывалось. Предполагалось, что теплофизические параметры образца не зависели от температуры. Геометрическая постановка задачи приведена на рис. 1.

В рамках численного моделирования решались одномерное уравнение теплопроводности и кинетическое уравнение:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - q_p k \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right), \quad (2)$$

$$\rho_i \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -k \rho_i \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right), \quad (3)$$

$$\rho_s \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \alpha_s k \rho_s \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right). \quad (4)$$

Начальные и граничные условия записывались следующим образом:

$$t = 0, T_i = T_{i0}, \quad (5)$$

$$z = 0, -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \alpha (T_1 - T_{ff}), \quad (6)$$

$$z = L_z; \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha (T_3 - T_{ff}), \quad (7)$$

$$z = L_{z1}; -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, T_3 = T_2, \quad (8)$$

$$z = L_{z2}; -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, T_2 = T_1, \quad (9)$$

$$t = 0; \varphi_i = \varphi_{i0}, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^4 \varphi_i = 1. \quad (11)$$

где ρ — плотность лесного горючего материала;
 c — удельная теплоемкость лесного горючего материала;

t — временная координата;

λ — коэффициент теплопроводности лесного горючего материала;

z — пространственная координата;

q_p — тепловой эффект реакции пиролиза лесного горючего материала;

k — предэкспонента пиролиза лесного горючего материала;

φ_1 — объемная доля сухого органического вещества;

φ_2 — объемная доля сажи;

φ_3 — объемная доля влаги;

φ_4 — объемная доля газовой смеси;

E — энергия активации пиролиза лесного топлива;

R — универсальная газовая постоянная;

α_s — коэффициент диспергирования;

α — коэффициент теплопередачи;

T_{ff} — температура пламени.

В ходе математического моделирования для решения дифференциальных уравнений применялся метод конечных разностей. Этот метод предполагает замену частных производных дифференциального уравнения на их конечноразностные аппроксимации. Область решения задачи представляет собой совокупность узлов. В результате замены частных производных на конечные разности получается незамкнутая система линейных алгебраических уравнений для вычисления температуры как локальной характеристики каждого узла сетки. Полученную систему замыкают с помощью разностных аппроксимаций для граничных условий и решают численным методом [25].

Поскольку в ходе математического моделирования рассматривались задачи, в которых область решения представляла собой разнородную структуру, в данном случае описания границы контакта использовалось граничное условие четвертого рода. На границе двух материалов задавались значения коэффициентов α_i и β_i . Решение полученной системы осуществляется методом прогонки с учетом неод-

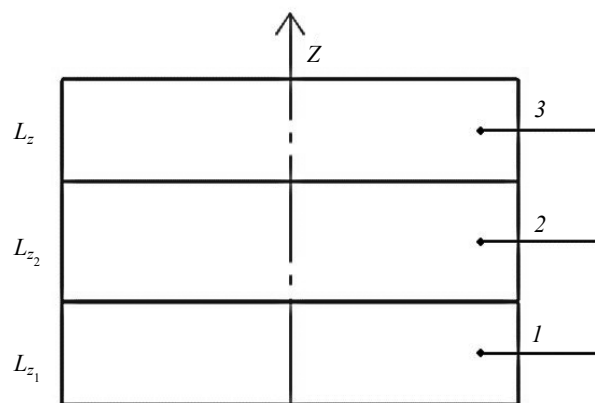


Рис. 1. Геометрическая постановка одномерной задачи теплопередачи в топливном элементе леса: 1 — слой сухого органического вещества; 2 — слой, представляющий смесь сухого органического вещества и воды; 3 — слой сухого органического вещества

Fig. 1. Geometric formulation of one-dimensional problem of heat transfer in a forest fuel element: 1 — a layer of dry organic matter; 2 — a layer that is a mixture of dry organic matter and water; 3 — a layer of dry organic matter

нородностей в элементе. Реализация вычислений осуществлялась с помощью программного пакета RAD Studio. Обработка графических результатов проводилась с помощью программного пакета OriginPro.

Выбор программного продукта для реализации вычислений обусловлен наличием компонентов, обеспечивающих работу с базами данных, что очень важно в контексте прогноза лесной пожарной опасности, поскольку современные системы мониторинга оперируют большим количеством разнородных данных [26]. Еще одним немаловажным преимуществом является возможность создания десктопных и мобильных приложений для разных операционных систем. Такая кроссплатформенность позволяет адаптировать написанный ранее программный код для работы в более сложных системах или запустить небольшой самостоятельный продукт. Также данный продукт позволяет проводить визуализацию данных внутри системы, что планируется реализовать по мере доработки математической модели [27].

Результаты и обсуждения

В данной работе был применен подход сценарного моделирования, описанный в [28]. При моделировании рассматривались четыре типа лесных пожаров: низовые лесные пожары низкой и высокой интенсивности, верховые лесные пожары и огненные штормы и три вида сезонов: весна, лето и осень.

Диапазоны значений основных параметров, используемых при моделировании, приведены в таблице.

Выявим основные закономерности тепломассопереноса на примере сценария низового пожара низкой интенсивности для летнего периода. На рис. 2 отражены температурные поля образца для различных времен воздействия.

Анализ температурных распределений показывает, что основное влияние лесного пожара обусловлено длительностью экспозиции элемента лесного горючего материала. Видна заметная разница в распределении температуры по толщине березового листа при временах воздействия 2, 3 и 5 с. Однако градиенты температуры по толщине листа небольшие, так как листовая пластина достаточно тонкая и успевает прогреться почти по всей толщине листа. Температура окружающего воздуха не оказывает заметного влияния на распределение температуры в структуре березового листа. Также была проанализирована динамика изменения фаз образца (рис. 3).

Анализ распределения фаз позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, самое большое влияние оказывает сценарий продукции сажевых частиц, обусловленный значением коэффициента диспергирования. Чем больше значение этого коэффициента, тем выше значение объемной доли образовавшихся сажевых частиц. Например, значения объемной доли сажевых частиц достигают величины 0,005 при минимальном сценарии и 0,023 при максимальном

Диапазоны параметров, используемых при моделировании

Ranges of parameters used in simulation

Температура среды, К Environment temperature, K	Начальная температура образца, К Initial temperature of the specimen, K	Время воздействия, с Exposure time, s	Коэффициент диспергирования Dispersion coefficient	Объемная доля влаги Volume ratio of moisture	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К) Heat loss coefficient, W/(m ² · K)
900 (Низовой пожар низкой интенсивности) (Low intensity surface fire)	279 (весна) (spring)	2; 3; 5	0,01; 0,03; 0,05	0,2; 0,3; 0,4	80
1000 (Низовой пожар высокой интенсивности) (High intensity surface fire)	293 (лето) (summer)				90
1100 (Верховой пожар) (Crown fire)	273 (осень) (autumn)				100
1200 (Огненный шторм) (Fire storm)					200

сценарии сажеобразования. Соответственно, летом и осенью эти значения составляют 0,005 и 0,03 также. Этот результат обусловлен заложенной в модель зависимостью кинетики сажеобразования от кинетики термического разложения сухого органического вещества. В свою очередь, согласно кинетической схеме, термическое разложение сухого органического вещества определяется температурой, которая достигается в элементе лесного горючего материала. Как было указано ранее, эти различия минимальны для различного периода пожароопасного сезона. Также следует отметить, что градиенты объемной доли сажевых частиц значительно выше при сценарии максимального сажеобразования. Причем, заметное образование сажевых частиц происходит при времени воздействия более 2 секунд, а максимальное их количество образуется на краях листа, где температура также максимальна, что обуславливает более интенсивное термическое разложение сухого органического вещества.

Кроме того, были проведены расчеты сажеобразования при различном влагосодержании лесного горючего материала. Зависимости изменения фаз с течением времени для этих случаев отражены на рис. 4.

Значения объемной доли влаги варьировались в диапазоне от 0,2 до 0,4. Анализ результатов показал, что с уменьшением объемной доли влаги образование сажевых частиц увеличивается. Эта разница в абсолютных значениях составляет порядка 0,01, т.е. происходит увеличение сажевых частиц примерно на треть при минимальном влагосодержании лесного горючего материала.

Ранее были проведены эксперименты по исследованию зажигания березового листа в трубчатой печи [24]. Согласно плану эксперимента, образец лесного горючего материала помещался в канал трубчатой печи до момента его пламенного сгорания. Процессы, происходящие в канале трубчатой печи, фиксировались с помощью высокоскоростной видеокамеры (скорость съемки 500 кадров в секунду). Визуально определялись моменты, когда происходило образование и выделение газообразных продуктов пиролиза, сопровождающееся образованием частиц сажи, и зажигание березового листа в газовой фазе. Установлено [24], что пиролиз сухого органического вещества происходит при времени порядка 0,2–1 с. При прочих равных в данной статье теоретически установлено, что пиролиз происходит при времени порядка 0,7–1,9 с. Разница в теоретических значениях составила в среднем 0,65 для различных сценариев математического моделирования. Указанные различия объясняются тем, что в эксперименте использовался предварительно высушенный образец лесного горючего материала. В данной же статье использован образец лесного горючего

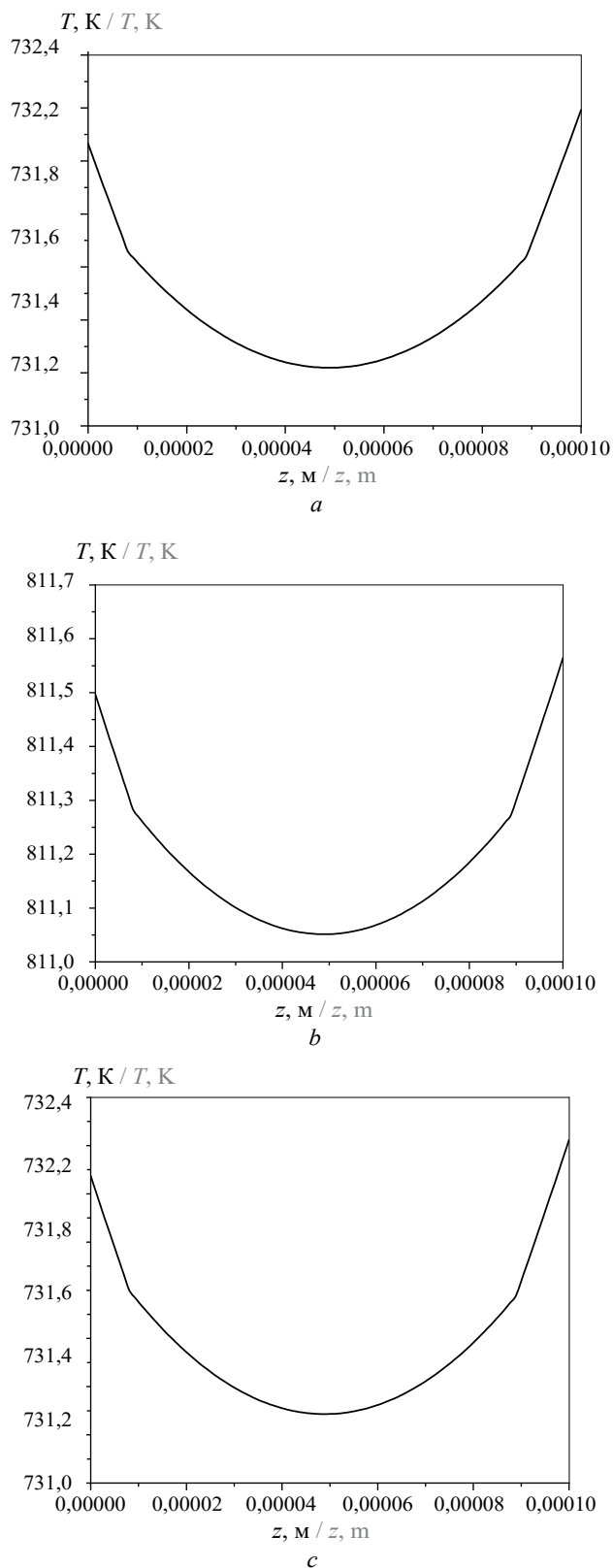


Рис. 2. Распределение температуры по толщине листа березы при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в различные моменты времени (лето, июль, +20 °С, $\varphi_{30} = 0,4$): а — $t = 2$ с; б — $t = 3$ с; в — $t = 5$ с

Fig. 2. Temperature distribution over the birch leaf thickness under the influence of a low-intensity surface fire at different moments in time (summer, July, +20 °C, $\varphi_{30} = 0,4$): а — $t = 2$ s; б — $t = 3$ s; в — $t = 5$ s

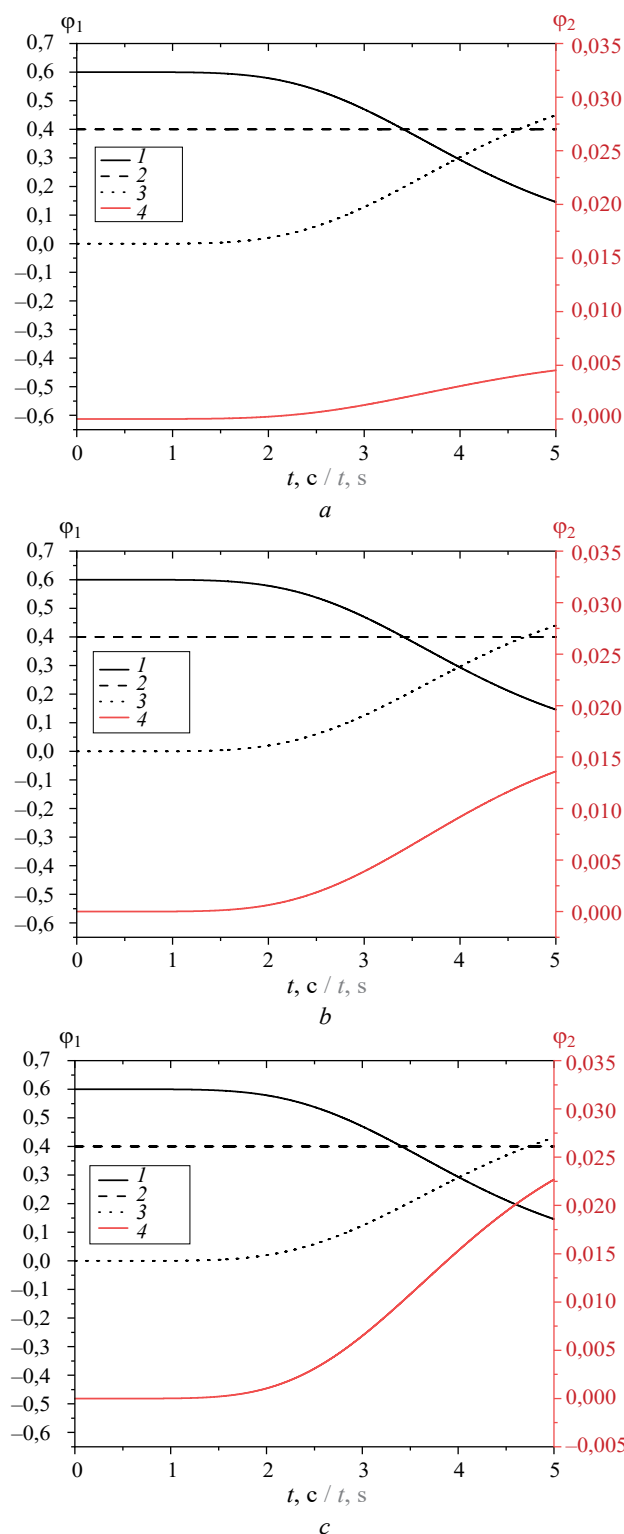


Рис. 3. Распределение объемных долей фаз при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в зависимости от времени (лето, июль, $+20^\circ\text{C}$, $\Phi_{30} = 0,4$) при различных значениях коэффициентов диспергирования: а — $\alpha_s = 0,01$; б — $\alpha_s = 0,03$; в — $\alpha_s = 0,05$ (1 — сухое органическое вещество; 2 — влага; 3 — газ; 4 — частицы сажи)

Fig. 3. Distribution of volume fractions of phases under the influence of a low-intensity surface forest fire depending on time (summer, July, $+20^\circ\text{C}$, $\Phi_{30} = 0.4$) and different values of dispersion coefficients: а — $\alpha_s = 0.01$; б — $\alpha_s = 0.03$; в — $\alpha_s = 0.05$ (1 — dry organic matter; 2 — moisture; 3 — gas; 4 — soot particles)

материала с ненулевым значением начальной влажности. В рамках данного исследования рассматривается лист березы, в центральном слое которого содержится влага. В статье рассмотрен сценарий, когда лист сорвался с ветки дерева и упал на поверхность почвы. Процессы влагообмена, характерные для живого листа, не рассматривались. Понятно, что погрешность математической модели относительно велика. Во-первых, это связано с различием условий проведения эксперимента. Во-вторых, лесной горючий материал представляет собой сложный неоднородный объект с развитой многомасштабной пористой структурой

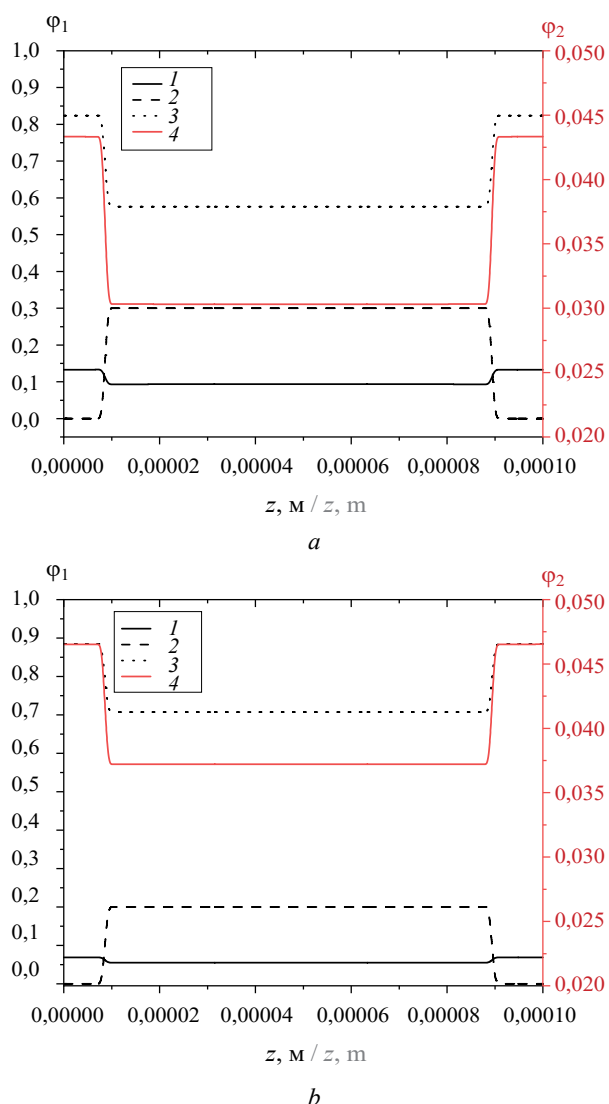


Рис. 4. Распределение объемных долей фаз при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в момент времени $t = 5$ с при различных значениях объемной доли влаги (лето, июль, $+20^\circ\text{C}$, $\alpha_s = 0,05$): а — $\Phi_{30} = 0,2$; б — $\Phi_{30} = 0,3$ (1 — сухое органическое вещество; 2 — влага; 3 — газ; 4 — частицы сажи)

Fig. 4. Distribution of volume fractions of phases under the influence of a low-intensity surface forest fire at the time $t = 5$ s for different values of the moisture volume fraction (summer, July, $+20^\circ\text{C}$, $\alpha_s = 0.05$): а — $\Phi_{30} = 0.2$; б — $\Phi_{30} = 0.3$ (1 — dry organic matter; 2 — moisture; 3 — gas; 4 — soot particles)

[6]. Моделирование таких объектов — нетривиальная задача. Согласно [6], погрешность математических моделей в теории лесных пожаров составляет от 30 до 580 %. Поэтому полученные результаты можно считать удовлетворительно согласующимися с результатами эксперимента [24].

Выводы

В рамках работы проведено исследование процессов тепломассопереноса в образце лесного горючего материала (листа березы), находящегося под воздействием высокотемпературной среды. Одномерная математическая модель позволяет проводить расчеты в режиме опережения времени, что чрезвычайно важно в контексте прогноза лесной пожарной опасности. В работе использован подход сценарного моделирования, который учитывает тип лесного пожара, период пожароопасного сезона, свойства лесного горючего материала, степень диспергирования лесного горючего материала, начальное влагосодержание элемента лесного горючего материала. Этот подход позволяет провести анализ изменения температурных и фазовых полей и определить особенности поведения образца, а также уйти от неопределенности при задании объемных долей компонентов сухого органического вещества. Выявлено, что основное влияние оказывает степень диспергирования лесного горючего материала и вид лесного пожара. Также установлено подобие качественных характеристик

процесса сажеобразования для всех видов лесных пожаров.

По результатам исследований установлено, что самое большое влияние на количество выделяемых частиц оказывает сценарий продукции сажевых частиц, обусловленный значением коэффициента диспергирования. Так, значения объемной доли сажевых частиц достигают величины 0,005 при минимальном сценарии и 0,023 при максимальном сценарии сажеобразования. Также было обнаружено влияние объемной доли влаги образца на образование сажевых частиц. Уменьшение доли влаги ведет к увеличению количества образующихся частиц сажи. Эта разница в абсолютных значениях составляет порядка 0,01.

Предложенная математическая модель может быть использована совместно с геоинформационными системами для визуализации исходной и выходной информации при оценке, мониторинге и прогнозировании лесных пожаров и их экологических последствий. Разработанная математическая модель позволяет проводить сценарное моделирование достаточно быстро и получать необходимые количественные оценки, например, прогнозировать объем выделяющихся сажевых частиц по конкретной лесопокрытой территории, если будет известен породный состав древостоя и запас лесного горючего материала. Разработанная математическая модель может быть применена и для других лесных горючих материалов, относящихся к листовым породам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V.* Forest fire occurrences and ecological impact prediction. Novosibirsk: Siberian branch of the Russian academy of sciences, 2017. 259 p.
2. *Punsompong P., Pani S.K., Wang S., Bich Pham T.T.* Assessment of biomass-burning types and transport over Thailand and the associated health risks // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 247. P. 118176. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.118176
3. *Castagna J., Senatore A., Bencardino M., D'Amore F., Sprovieri F., Pirrone N., Mendicino G.* Multiscale assessment of the impact on air quality of an intense wildfire season in southern Italy // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 761. P. 143271. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143271
4. *Adam M.G., Tran P.T.M., Bolan N., Balasubramanian R.* Biomass burning-derived airborne particulate matter in Southeast Asia: A critical review // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 407. P. 124760. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124760
5. *Yoshizue M., Taketani F., Adachi K., Iwamoto Y., Tohjima Y., Mori T., Miura K.* Detection of aerosol particles from Siberian biomass burning over the Western North Pacific: 11 // *Atmosphere. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020. Vol. 11. Issue 11. P. 1175. DOI: 10.3390/atmos1111175
6. *Grishin A.M.* Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Tomsk : Publishing House of the Tomsk State University, 1997. 407 p.
7. *Josephson A.J., Castaño D., Koo E., Linn R.R.* Zonal-based Emission source term model for predicting particulate emission factors in wildfire simulations // *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. Issue 2. Pp. 943–971. DOI: 10.1007/s10694-020-01024-7
8. *Invally M., Kaur G., Kaur G., Bhullar S.K., Buttar H.S.* Health care burden of cardiorespiratory diseases caused by particulate matter and chemical air pollutants // *World Heart Journal*. 2017. Vol. 57. Issue 2. Pp. 303–317.
9. *Borchers-Arriagada N., Palmer A.J., Bowman D.M.J.S., Williamson G.J., Johnston F.H.* Health impacts of ambient biomass smoke in Tasmania, Australia // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. Vol. 17. Issue 9. P. 3264. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093264>

10. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. Pp. 1081–1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
11. Hameed S., Sharma A., Pareek V., Wu H., Yu Y. A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models // *Biomass Bioenergy*. 2019. Vol. 123. Pp. 104–122. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.008
12. Prakash N., Karunanithi T. Kinetic modeling in biomass pyrolysis — A review // *Journal of Applied Sciences Research*. 2008. Vol. 4. Issue 12. Pp. 1627–1636.
13. Amini E., Safdari M., Johnson N., Weise D.R., Fletcher T.H. Pyrolysis kinetics of wildland vegetation using model-fitting methods // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021. Vol. 157. P. 105167. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105167
14. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. Pp. 1081–1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
15. Cai J., Wu W., Liu R. An overview of distributed activation energy model and its application in the pyrolysis of lignocellulosic biomass // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 36. Pp. 236–246. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.052
16. Асеева Р.М., Буй Динь Тхань, Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Выделение дыма при термическом разложении и горении древесины // *Лесной Вестник*. 2004. № 2. С. 99–103.
17. Samsonov Y.N., Ivanov V.A., McRae D. J., Baker S.P. Chemical and dispersal characteristics of particulate emissions from forest fires in Siberia // *International Journal of Wildland Fire*. 2012. Vol. 21. Issue 7. Pp. 818–827. DOI: 10.1071/WF11038
18. Kukhar I.V., Orlovskiy S.N., Martynovskaya S.N. Forest fires environmental impact study // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548. Issue 5. P. 052061. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052061
19. Chen J., Li C., Ristovski Z., Milic A., Gu Y., Islam M.S. et al. A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 579. Pp. 1000–1034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.025
20. Макаров В.И., Попова С.А., Дубцов С.Н., Плехотниченко М.Е. Спектр размеров и химический состав дымовой эмиссии при УФ облучении в режиме тлеющего горения лесных материалов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 2. № 4. С. 196–201. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36481590>
21. Barboni T., Leonelli L., Santoni P.A., Tihay-Felicelli V. Aerosols and carbonaceous and nitrogenous compounds emitted during the combustion of dead shrubs according to twigs' diameter and combustion phases // *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 113. P. 102988. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102988
22. Guo L., Ma Y., Tigabu M., Guo X., Zheng W., Guo F. Emission of atmospheric pollutants during forest fire in boreal region of China // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 264. P. 114709. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114709
23. Бородин А.А., Некрасов В.И., Некрасов Н.С., Петрова И.П., Плотникова Л.С., Смирнова Н.Г. Деревья и кустарники СССР. М. : Мысль, 1966. 639 с.
24. Барановский Н.В., Кириенко В.А. Исследование зажигания лесных горючих материалов в высокотемпературной среде // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93. № 5. С. 1310–1315.
25. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск : Томский политехнический университет, 2007. 172 с.
26. Бухаров Т.А., Нафикова А.Р. About developing database applications using embarcadero rad studio and Microsoft Access // *Colloquium-journal*. 2019. № 12–3 (36). С. 42–44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38304692>
27. Винокуров А.С., Баженов Р.И. Разработка кросс-платформенного мобильного приложения «GPS навигатор» в среде RAD Studio XE8 // *Постулат*. 2016. № 11 (13). Ст. 4.
28. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2007. 153 с.

REFERENCES

1. Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V. *Forest fire occurrences and ecological impact prediction*. Novosibirsk, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 2017; 259. (rus).
2. Punsompong P., Pani S.K., Wang S., Bich Pham T.T. Assessment of biomass-burning types and transport over Thailand and the associated health risks. *Atmospheric Environment*. 2021; 247:118176. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.118176
3. Castagna J., Senatore A., Bencardino M., D'Amore F., Sprovieri F., Pirrone N., Mendicino G. Multiscale assessment of the impact on air quality of an intense wildfire season in southern Italy. *Science of the Total Environment*. 2021; 761:143271. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143271
4. Adam M.G., Tran P.T.M., Bolan N., Balasubramanian R. Biomass burning-derived airborne particulate matter in Southeast Asia: A critical review.

- Journal of Hazardous Materials*. 2021; 407:124760. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124760
5. Yoshizue M., Taketani F., Adachi K., Iwamoto Y., Tohjima Y., Mori T., Miura K. Detection of aerosol particles from Siberian biomass burning over the Western North Pacific: 11. *Atmosphere. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020;11(11):1175. DOI: 10.3390/atmos11111175
 6. Grishin A.M. *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them*. Tomsk, Publishing House of the Tomsk State University, 1997; 407.
 7. Josephson A.J., Castaño D., Koo E., Linn R.R. Zonal-based emission source term model for predicting particulate emission factors in wildfire simulations. *Fire Technology*. 2021; 57(2):943-971. DOI: 10.1007/s10694-020-01024-7
 8. Invally M., Kaur G., Kaur G., Bhullar S.K., Buttar H.S. Health care burden of cardiorespiratory diseases caused by particulate matter and chemical air pollutants. *World Heart Journal*. 2017; 57(2):303-317.
 9. Borchers-Arriagada N., Palmer A.J., Bowman D.M.J.S., Williamson G.J., Johnston F.H. Health impacts of ambient biomass smoke in Tasmania, Australia. *International Journal of Environmental Research and Public Health. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020; 17(9):3264. DOI: 10.3390/ijerph17093264
 10. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 50:1081-1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
 11. Hameed S., Sharma A., Pareek V., Wu H., Yu Y. A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models. *Biomass Bioenergy*. 2019; 123:104-122. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.008
 12. Prakash N., Karunanithi T. Kinetic modeling in biomass pyrolysis — A review. *Journal of Applied Sciences Research*. 2008; 4(12):1627-1636.
 13. Amini E., Safdari M., Johnson N., Weise D.R., Fletcher T.H. Pyrolysis kinetics of wildland vegetation using model-fitting methods. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021; 157:105167. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105167
 14. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 50:1081-1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
 15. Cai J., Wu W., Liu R. An overview of distributed activation energy model and its application in the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 36:236-246. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.052
 16. Aseeva R.M., Thanh B.D., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Emission of smoke during thermal decomposition and combustion of wood. *Forest Bulletin*. 2004; 2:99-10. (rus).
 17. Samsonov Y.N., Ivanov V.A., McRae D.J., Baker S.P. Chemical and dispersal characteristics of particulate emissions from forest fires in Siberia. *International Journal of Wildland Fire*. 2012; 21(7):818-827. DOI: 10.1071/WF11038
 18. Kukhar I.V., Orlovskiy S.N., Martynovsakaya S.N. Forest fires environmental impact study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548(5):052061. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052061
 19. Chen J., Li C., Ristovski Z., Milic A., Gu Y., Islam M.S. et al. A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. *Science of The Total Environment*. 2017; 579:1000-1034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.025
 20. Makarov V.I., Popova S.A., Dubtsov S.N., Plokhotnichenko M.E. Size distribution and the chemical composition of smoke emission under uv irradiation upon smoldering combustion of forest fuels. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018; 2(4):196-201. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36481590> (rus).
 21. Barboni T., Leonelli L., Santoni P.A., Tihay-Fellicelli V. Aerosols and carbonaceous and nitrogenous compounds emitted during the combustion of dead shrubs according to twigs' diameter and combustion phases. *Fire Safety Journal*. 2020; 113:102988. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102988
 22. Guo L., Ma Y., Tigabu M., Guo X., Zheng W., Guo F. Emission of atmospheric pollutants during forest fire in boreal region of China. *Environmental Pollution*. 2020; 264:114709. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114709
 23. Borodina N.A., Nekrasov V.I., Nekrasova N.S., Petrova I.P., Plotnikova L.S., Smirnova N.G. *Trees and shrubs of the USSR*. Moscow, Mysl' Publ., 1966; 639. (rus).
 24. Baranovskiy N.V., Kirienko V.A. Investigation of the ignition of forest combustible materials in a high-temperature environment. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020; 93(5):1310-1315. (rus).
 25. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Difference methods for solving heat conduction problems*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2007; 172. (rus).
 26. Bukharov T.A., Nafikova A.R. About developing database applications using embarcadero rad studio and Microsoft Access. *Colloquium-journal*. 2019; 12-3(36):42-44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38304692> (rus).
 27. Vinokurov A.S., Bazhenov R.I. Developing cross-platform mobile app "GPS Navigator" in the environment RAD Studio XE8. *Postulate*. 2016; 11(13):4. (rus).
 28. Baranovskiy N.V. *Mathematical modeling of the most probable scenarios and conditions for the occurrence of forest fires : dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences*. Tomsk, 2007; 153. (rus).

Поступила 08.04.2022, после доработки 05.05.2022;
принята к публикации 16.05.2022

Received April 8, 2022; Received in revised form May 5, 2022;

Accepted May 16, 2022

Информация об авторах

БАРАНОВСКИЙ Николай Викторович, канд. физ.-мат. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; РИНЦ ID: 127290; Scopus Author ID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

ВЯТКИНА Виктория Андреевна, аспирант Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; Scopus Author ID: 57219222597; ORCID: 0000-0002-0997-4747; e-mail: kirienkvik@gmail.com

Вклад авторов:

Барановский Н.В. — научное руководство; концепция исследования; разработка и верификация математической модели; доработка текста; итоговые выводы.

Вяткина В.А. — разработка и верификация математической модели; обработка результатов; написание исходного текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nikolay V. BARANOVSKIY, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Butakov Research Center, School of Energy & Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina Prospekt, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; ID RISC: 127290; Scopus Author ID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

Viktoriya A. VYATKINA, Postgraduate Student of the Butakov Research Center, School of Energy & Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina Prospekt, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scopus Author ID: 57219222597; ORCID: 0000-0002-0997-4747; e-mail: kirienkvik@gmail.com

Contribution of the authors:

Baranovskiy N.V. — scientific management; research concept; methodology development; development and verification of the mathematical model; final conclusions.

Vyatkina V.A. — development and verification of the mathematical model; processing results; writing the original text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.