

Математическое моделирование воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции деревянного здания в сельском населенном пункте

Николай Викторович Барановский¹✉, Софья Андреевна Галаутдинова², Алексей Олегович Малинин¹

¹ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

² ООО «Томскнефтехим», г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Лесные пожары ведут к экономическому ущербу государству, например, к повреждению и уничтожению гражданских и промышленных зданий в сельской местности. Цель исследования — разработка физико-математической модели воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции здания. Задачи исследования: 1) формулировка физической и математической моделей; 2) программная реализация математической модели на языке программирования высокого уровня; 3) численное исследование процессов теплопереноса в ограждающих конструкциях здания.

Методы. Рассматриваются низовой лесной пожар низкой интенсивности, низовой лесной пожар высокой интенсивности, верховой лесной пожар, огненный шторм. Рассматривается элемент двухслойной ограждающей конструкции деревянного здания с оконным проемом. Рассматривается воздействие конвективного теплового потока. Процессы теплопереноса в ограждающих конструкциях здания описываются системой нестационарных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Двумерные уравнения теплопроводности решены локально-одномерным методом. Для численной реализации представленной математической модели использован метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений в частных производных решены методом прогонки.

Результаты и их обсуждение. Получены распределения температуры в структурно неоднородном элементе ограждающей конструкции здания. Анализ показывает, что температурные поля практически одинаковые для различных сезонов возникновения лесных пожаров. Заметная разница отмечается только вблизи контакта ограждающей конструкции с почвой. В целом более высокая температура наблюдается в верхней части ограждающей конструкции на границе с кровлей здания. Стекло в оконном проеме нагревается до достаточно высоких температур, что в реальной ситуации приведет к его разрушению в период воздействия фронта лесного пожара. Оконный проем является самой уязвимой для пламени зоной в ограждающей конструкции. Кроме того, в результате численного моделирования установлено, что максимальные градиенты температур возникают в облицовочном материале.

Выводы. Предложены рекомендации по повышению пожарной безопасности зданий в сельской местности и применению предложенной физико-математической модели.

Ключевые слова: теплоперенос; конвективный тепловой поток; стена; облицовочный материал; программная реализация; пожарная безопасность

Для цитирования: Барановский Н.В., Галаутдинова С.А., Малинин А.О. Математическое моделирование воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции деревянного здания в сельском населенном пункте // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 22–36. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.22-36

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

Mathematical simulation of the impact of forest fire front on the enclosing structures of wooden building in rural settlement

Nikolay V. Baranovskiy¹✉, Sofya A. Galautdinova², Alexey O. Malinin¹

¹I.N. Butakov Research Educational Center of School of ENergy and Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

²“Tomskneftekhim” Ltd, Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Forest fires lead to economic damage to the state, for example, damage and destruction of civil and industrial buildings in rural areas. The purpose of the study is to develop physical and mathematical models of the forest fire front impact on the building enclosures. Research objectives: 1) formulation of physical and mathematical models; 2) software implementation of a mathematical model in a high-level programming language; 3) numerical study of heat transfer processes in building enclosures.

Methods. A low-intensity surface forest fire, a high-intensity surface forest fire, a crown forest fire, and a fire storm are considered. An element of a two-layer enclosing structure of a wooden building with a window opening is considered. The effect of convective heat flow is considered. Heat transfer processes in the building enclosures are described by a system of non-stationary heat conduction equations with the corresponding initial and boundary conditions. Two-dimensional heat equations were solved using the locally one-dimensional method. For numerical implementation of the presented mathematical model, the finite difference method was used. Difference analogues of partial differential equations are solved by the marching method.

Results and discussion. Temperature distributions in a structurally inhomogeneous element of the building enclosures were obtained. The analysis shows that the temperature fields are almost the same for different seasons of forest fires. The noticeable difference is only near the contact of the enclosing structure with the soil. In general, higher temperatures are observed in the upper part of the building enclosures at the border with the roof of the building. The glass in the window opening is heated up to sufficiently high temperatures. This will lead to its destruction during the period of exposure to the forest fire front. The window opening is the most vulnerable area to flame in the building enclosures. In addition, as a result of numerical modelling, it was established that maximum temperature gradients occur in the cladding material.

Conclusion. Recommendations are proposed for improving the fire safety of buildings in rural areas and the application of the proposed physical and mathematical model were suggested.

Keywords: heat transfer; convective heat flux; wall; cladding material; software implementation; fire safety

For citation: Baranovskiy N.V., Galautdinova S.A., Malinin A.O. Mathematical simulation of the impact of forest fire front on the enclosing structures of wooden building in rural settlement. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):22-36. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.22-36 (rus).

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

Введение

Лесные пожары представляют собой катастрофическое явление, которое наносит, в том числе, экономический и социальный ущерб [1]. Первый выражается в количестве поврежденной или погибшей деловой древесины, а также в ущербе от уничтожения или повреждения сельских населенных пунктов, что имело место быть в последнее десятилетие [2, 3]. Социальный же ущерб выражается в числе пострадавших или погибших людей при лесных пожарах. На урбанизированных территориях жилые постройки могут быть вовлечены в процессы горения [4]. Основное воздействие лесного пожара направлено на ограждающие конструкции жилого здания или какой-либо постройки. Один из механизмов передачи тепла в случае воздействия открытого пламени лесного пожара — конвективный теплообмен [5]. Проведение масштабных экспериментов либо запрещено, либо затруднительно в силу невозможности проконтролировать все параметры процесса [6].

В настоящее время существуют различные варианты оценки пожарной безопасности жилых и промышленных объектов на урбанизированных территориях при активных лесных пожарах в их окрестности. Такие пожары могут иметь воздействие на данные объекты.

Можно выделить следующие методики и программные продукты, доступные в настоящее время.

1. Программная утилита PyroSim на основе FDS¹. Это зарубежная разработка NIST (National Institute of Standard and Technology). Fire Dynamic Simulator — это развитый программный продукт для моделирования пожаров. Данный пакет, помимо одиночного использования в среде операционной среды Windows, позволяет использовать библиотеку передачи сообщений MPI и интерфейс OpenMP (причем совместно) для параллельной обработки данных и вычислений. Вычислительная начинка пакета позволяет в стандартных условиях моделировать одномерный кондуктивный теплоперенос в материалах, хотя в стадии тестирования возможно 3D-моделирование данных процессов. Также функционал пакета позволяет моделировать пиролиз, горение и сажеобразование. Кроме того, в пакете заложена возможность моделирования распространения лесного пожара. PyroSim — программная оболочка для использования в качестве решателя программного пакета FDS. Это также зарубежная разработка², которая может потребовать замещения при переходе на отечественные программные продукты. В любой момент условия распространения данного программного обеспечения могут измениться. Вплоть до полного запрета на использование данного программного обеспечения на территории Российской Федерации. Особенно в текущих геополитических условиях.

¹ Fire Dynamic Simulator. URL: <https://pages.nist.gov/fds-smv/>

² URL: <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim>

2. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Этот нормативный документ разработан в рамках Приказа МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404³. В пункте «Общие положения» указано, что данная методика не распространяется на определение расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, расположенных в лесах. Методика в принципе не предназначена для определения величин пожарного риска жилых и общественных зданий. Более того, методика предназначена для определения величины пожарного риска при возникновении очага пожара внутри рассматриваемого производственного объекта, а не при воздействии поражающих факторов лесного пожара.

3. Свод правил 4.13130⁴. Этот нормативный документ разработан в рамках Приказа от 24 апреля 2013 г. № 288 МЧС РФ⁵ в соответствии с Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ⁶. Данный свод правил содержит только требования к жилым постройкам и относит их к тому или иному классу пожарной опасности. Аналогичная ситуация с объектами типа складов лесных материалов и других зданий, сооружений и объектов. Полезная для математического моделирования информация содержится в Приложении А5 (Методика определения безопасных противопожарных разрывов (расстояний) между жилыми, общественными зданиями и сооружениями). Здесь же приведена таблица с критическими значениями плотности лучистого теплового потока для различных материалов. Целью же данной статьи является изучение воздействия на материалы конвективного теплового потока.

4. Создание уникального программного кода собственной разработки. Последний вариант самый тяжелый и труднореализуемый, но именно он обеспечивает независимость разработки и эксплуатации такого программного обеспечения в условиях необходимого замещения импортной продукции. К настоящему времени создано достаточное число систем разработки программного обеспечения и вычислительных систем, например Microsoft Visual Studio⁷, Embarcadero RAD

Studio⁸, Matlab⁹ ANSYS¹⁰. Такие системы могут быть использованы для разработки вычислительных программ, которые моделируют процесс теплопереноса в ограждающих конструкциях жилого здания или постройки.

Использование вычислительных систем позволит исключить проведение опасных и дорогостоящих экспериментов по воздействию лесного пожара на жилые и прочие постройки в сельском населенном пункте или промышленном объекте. Кроме того, возможно проведение сценарного моделирования для оценки последствий различных вариантов воздействия лесного пожара на жилые и прочие постройки.

Цель исследования — разработка физико-математической модели воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции здания.

Краткий обзор литературы

Огромное количество как отдельных жилых зданий, так и целых поселений подвержено влиянию лесного пожара каждый год, особенно в районах, где строения интегрированы в лесной массив [7]. В течение последних десяти лет продолжает интенсифицироваться застройка лесных массивов зданиями разного назначения, и в будущем данное направление будет стремительно развиваться [8, 9]. Для данных регионов существенным фактором является риск возникновения лесного пожара, который может быть вызван как природными, так и техногенными факторами [10, 11].

Для того чтобы приступить к обсуждению мер по снижению риска воздействия лесного пожара через контроль за лесным горючим материалом, полезно провести классификацию земель [12]:

1. Зоны дикой природы, малодоступные человеку, и, как следствие, риск возникновения пожара по техногенным причинам минимален. Контроль за состоянием лесного горючего материала сводится к снижению мощности лесного пожара.

2. Основные зоны лесного управления, включающие более доступные участки леса, а также участки с деловой древесиной.

3. Жилые зоны. Участки, где соприкасаются границы домов с границами леса.

Часто контроль за лесными горючими материалами направлен на защиту мест массовых поселений и инфраструктурных объектов.

Вторая и третья зона могут быть далее условно разделены на три группы снижения риска [13]:

- единичные конструкции и примыкающее окружение;

³ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404. URL: <https://base.garant.ru/196118/?ysclid=lv7pzt8wbl453436576>

⁴ Свод правил 4.13130. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101593?ysclid=lv7q2m2xjq190034817>

⁵ Об утверждении свода правил 4.131303 : Приказ от 24 апреля 2013 г. № 288.

⁶ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 14.07.2022).

⁷ URL: <https://visualstudio.microsoft.com/ru/>

⁸ URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/rad-studio>

⁹ URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

¹⁰ URL: <https://www.ansys.com/>

- границы между населенными пунктами и дикой растительностью;
- дикая растительность между населенными пунктами.

Необходимость подготовки к лесным пожарам привела к тому, что за последние 30 лет были внедрены компьютерные технологии в процессы моделирования поведения пожара [14], определения местоположения и состояния лесного горючего материала [15, 16], а также составления карт риска возникновения лесного пожара на больших территориях [17, 18].

Такое продвижение в области картографии было реализовано в значительной степени за счет различных геопространственных технологий, включая географические информационные системы (ГИС) и дистанционное зондирование. Данные технологии позволяют проводить экономическую оценку различных особенностей ландшафта без проведения длительных экспедиций в исследуемую область [19].

В последнее время работы в области моделирования воздействия пламени на деревянные конструкции постепенно переходят от вероятностных моделей к детерминированным моделям. При этом возможно моделирование конструктивных элементов зданий.

Так, например, в [20] было произведено численное моделирование шпоночного соединения, полученные результаты имели хорошее согласование с ранее полученными экспериментальными данными. Данный факт свидетельствовал, что компонентная модель может моделировать соединения древесины при огневом воздействии с высокой точностью. В [21] производилось моделирование деревянного соединения двух балок, соединения в виде ласточкиного хвоста. Методом исследования был выбран метод конечных элементов, моделирование происходило в программной среде ANSYS, полученные результаты имели хорошее согласование с ранее полученными экспериментальными данными.

Работа [22] посвящена созданию математической модели структурного поведения деревянных колонн при пожаре для оценки несущей способности деревянных колонн. Особое внимание было уделено критическим нагрузкам на изгиб. Были получены зависимости влияния коэффициента упругости, уровня нагрузки и влажности на критические нагрузки на изгиб. До этого были проведены натурные огневые испытания колонн [23, 24], однако они имели ряд таких недостатков, как дороговизна, плохая повторяемость и достоверность результатов [25]. Поэтому в данной области исследований активно развива-

ются аналитические, численные, полуэмпирические и эмпирические методы.

Физико-математическая постановка

В качестве физической модели была взята одноквартирная деревянная постройка, расположенная вблизи лесного массива, охваченного пожаром. Фронт лесного пожара распространяется с малой скоростью в условиях отсутствия ветра. Ограждающая конструкция данной постройки представлена в виде двухслойной пластины. Первый слой облицовка, второй древесина. Тепло от фронта лесного пожара передается к стенке конвекцией. Главным параметром безопасности деревянной постройки является факт воспламенения (или не воспламенения) ограждающей конструкции деревянной постройки при достижении достаточной температуры на поверхности.

При составлении физической модели были сделаны следующие допущения:

- рассматривается теплопередача в ограждающей конструкции за счет кондукции;
- рассматривается двумерная постановка;
- очаг пожара задается параметрически;
- теплофизические свойства древесины и стекла не зависят от температуры;
- наличие лакокрасочного покрытия пренебрегается;
- предполагается катастрофический сценарий пожарной погоды, когда в поверхностном слое стены отсутствует влага;
- пиролиз древесины пренебрегается;
- стена двухслойная с оконным проемом.

В табл. 1 представлены теплофизические характеристики древесины и облицовочных материалов¹¹.

В табл. 2 представлены теплофизические характеристики теплоизоляционных и облицовочных материалов.

В табл. 3 представлены теплофизические характеристики различных видов пожаров.

Таблица 1. Теплофизические характеристики древесины и облицовочных материалов¹⁰

Table 1. Thermophysical characteristics of wood and cladding materials¹⁰

Материал Material	c , Дж/(кг·К) c , J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	λ , Дж/(м·К) λ , J/(m·K)
Сосна Pine	1670	500	0,12
Облицовочный картон Building-paper	2300	100	0,18

¹¹ URL: <https://novosibirsk.leroymerlin.ru/product/blok-haus-hvoya-28h146h3000-mm-sort-optima-3-sht-1-31-m-81947969/#nav-characteristics>

В табл. 4 представлены теплофизические характеристики стекла.

В табл. 5 представлены исходные данные для численного моделирования.

В целях математического моделирования стены деревянного строения можно упрощенно представить как слоистую структуру, на которую оказывает воздействие конвективный тепловой поток от фронта лесного пожара. Так как стена деревянного дома состоит из двух основных слоев: древесины и теплоизоляционного/облицовочного материала, а также стекольного проема, то в качестве идеальной модели рассмотрим двумерную двухслойную модель деревянного строения (рис. 1),

Таблица 2. Теплофизические характеристики теплоизоляционных и облицовочных материалов¹² [26, 27]

Table 2. Thermophysical characteristics of thermal insulation and cladding materials¹² [26, 27]

Материал Material	c , Дж/(кг·К) c , J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	λ , Дж/(м·К) λ , J/(m·K)
Асбестовый картон Asbestos Board	1500	1600	0,4
Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	2700	500	0,14

Таблица 3. Теплофизические характеристики различных видов пожаров

Table 3. Thermophysical characteristics of various types of fires

Вид пожара Fire type	T , К	α , Вт/(м ² ·К) α , W/(m ² ·K)
Огненный смерч Firestorm	1200	200
Верховой пожар Crown fire	1100	150
Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire	1000	110
Низовой пожар низкой интенсивности Low-intensity surface fire	900	80

Таблица 4. Теплофизические характеристики стекла [28]

Table 4. Thermophysical characteristics of glass [28]

Материал Material	c , Дж/(кг·К) c , J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	λ , Дж/(м·К) λ , J/(m·K)
Стекло Glass	703	2500	0,76

¹² URL: tat/1428075110.html#:~:text=Характеристика%20ПТЭ-100%3A%20Плотность%3A%2084%20,-120%20до%20%2B700%20Упаковка%20ПТЭ-100%3A

в которой тепло передается посредством теплопроводности.

На рис. 2 представлена схема области решения.

Математически процесс теплопередачи описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Метод конечных разностей используется для решения дифференциальных уравнений в частных производных [29–31].

Таблица 5. Исходные данные для численного моделирования
Table 5. Input data for numerical modelling

Период года Season	Толщина слоя, см Layer thickness, cm	Материал Material	Время воздействия, с Exposure time, s	Вид пожара Fire type
Лето ($T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) Summer ($T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)	50	Сосна Pine	50	Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire

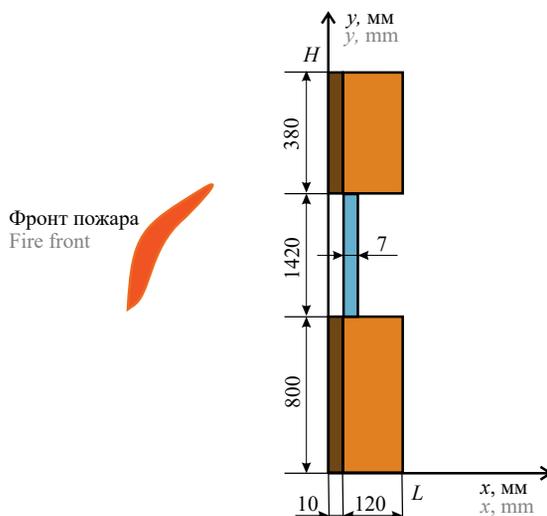


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи
Fig. 1. Geometric formulation of the problem

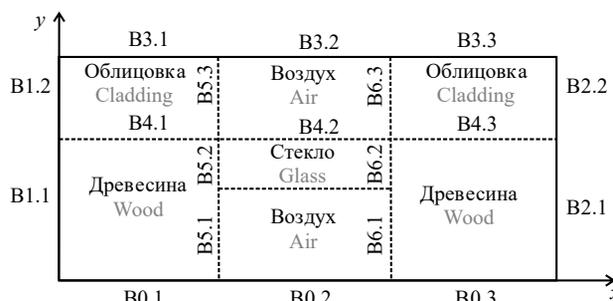


Рис. 2. Схема области решения
Fig. 2. Solution domain diagram

Математическая модель представлена ниже. Система уравнений процесса теплопередачи представляет собой:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right);$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right);$$

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \right);$$

$$\rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} \right).$$

Начальные и граничные условия:

$$T_i|_{t=0} = T_{i0};$$

$$B0.1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{\text{вн}} (T_{\text{вн}} - T_1);$$

$$B0.2: T_4 = T_e;$$

$$B0.3: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{\text{вн}} (T_{\text{вн}} - T_1);$$

$$B1.1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{\text{поч}} (T_{\text{поч}} - T_1);$$

$$B1.2: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{\text{поч}} (T_{\text{поч}} - T_2);$$

$$B2.1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2);$$

$$B2.2: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2);$$

$$B3.1: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2);$$

$$B3.2: -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_4);$$

$$B3.3: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2);$$

$$B4.1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=xb} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=xb}, T_1 = T_2;$$

$$B4.2: -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=xb} = \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_3);$$

$$B4.3: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=xb} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=xb}, T_1 = T_2;$$

$$B5.1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb}, T_1 = T_4;$$

$$B5.2: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{y=xb}, T_1 = T_3;$$

$$B5.3: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb}, T_2 = T_4;$$

$$B6.1: -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb}, T_4 = T_1;$$

$$B6.2: -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb}, T_3 = T_1;$$

$$B6.3: -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{y=xb}, T_4 = T_2,$$

где T_i , λ_i , c_i , ρ_i — температура, теплопроводность, теплоемкость и плотность i -го элемента ограждающей конструкции;

t — время;

$B_{j,k}$ — границы области решения и подобластей;

x, y — пространственные координаты;

$\alpha_{\text{вн}}$ — коэффициент теплоотдачи с внутренним пространством строения;

$T_{\text{окр}}$, $T_{\text{вн}}$, $T_{\text{поч}}$, T_0 — температура фронта пламени, внутреннего пространства, почвы и в начальный момент времени;

$\alpha_{\text{поч}}$ — коэффициент теплопередачи на границе с почвой;

$\alpha_{\text{окр}}$ — коэффициент теплоотдачи с окружающей средой (фронтом пожара).

Результаты и обсуждение

В рамках первого сценария рассматривается воздействие фронта верхового лесного пожара на ограждающую конструкцию деревянного здания в различные сезоны года. Облицовка стен выполнена из сайдинга «блок-хаус хвоя». Второй изготовлен из сосновой древесины. Время воздействия фронта пламени на ограждающие конструкции 300 с (табл. 6). Распределение температур для летнего периода представлено на рис. 3.

Анализ полученных зависимостей показывает, что распределения температур практически одинаковые для различных сезонов возникновения верховых

Таблица 6. Исходные данные для численного моделирования
Table 6. Input data for numerical modelling

Период года Season	Материал Material	Облицовочный материал Cladding	Время воздействия, с Exposure time, s
Осень ($T_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$) Autumn ($T_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$)	Сосна Pine	Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	300
Весна ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$) Spring ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$)			
Лето ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$) Summer ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$)			

лесных пожаров. Заметная разница только вблизи контакта ограждающей конструкции с почвой. В целом более высокая температура наблюдается в верхней части ограждающей конструкции на границе с кровлей здания. Причем видно, что фронт пламени воздействует и со стороны стены, и со стороны кровли. На рисунке видно, что стекло в оконном проеме нагревается до достаточно высоких температур, что в реальной ситуации приведет к его разрушению в период воздействия фронта верхового лесного пожара. Оконный проем является самой уязвимой для пламени зоной в ограждающей конструкции. Кроме того, в результате численного моделирования установлено, что максимальные градиенты температур возникают в облицовочном материале. По величине они примерно одинаковые как для случая использования облицовочного материала, так и для случая необлицованной древесины. Как показывает анализ результатов, температура поверхностного слоя выше критической температуры для любого типа облицовочного материала. Кроме того, облицовочный слой прогревается на глубину 1 см. Разница в температуре поверхности и поверхностного слоя 40–80 К не имеет значения. Все виды облицовки не могут быть рассмотрены в качестве противопожарной защиты.

Следует предположить, что в этом случае владелец здания может использовать только предварительные меры для минимизации ущерба, а именно удаление кустарников и прокладку минерализованных полос на определенном расстоянии от здания. Речь идет о зданиях, расположенных на так называемых урбанизированных территориях, когда лесная растительность перемежается с постройками того же сельского населенного пункта. В качестве возможной альтернативы человек должен обеспечить возможность покинуть здание в период возникновения лесного пожара на сопредельной лесопокрытой территории, чтобы избежать травм, ожогов и летального исхода

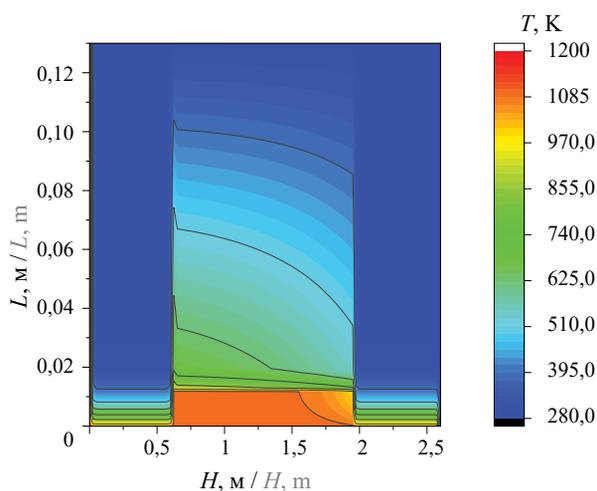


Рис. 3. Распределение температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» для летнего сезона при условии воздействия верхового лесного пожара (300 с)

Fig. 3. Temperature distribution in the layered structure of a wooden structure made of pine and siding “log-cabin pine” subjected to exposure of a crown forest fire for the summer season (300 s)

в условиях активных лесных пожаров. В рамках второго сценария рассмотрены варианты воздействия различных типов лесных пожаров на ограждающие конструкции деревянного здания (табл. 7). Время воздействия 300 с.

На рис. 4 представлены результаты моделирования воздействия различных видов лесного пожара на слоистую структуру деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя». Как было установлено в результате моделирования, ограждающие конструкции нагреваются в основном на стадии, предшествующей воспламенению, и нагрев происходит в поверхностных слоях облицовки толщиной около 2 см (максимальные градиенты температуры в приповерхностном слое облицовочного материала толщиной 1 см).

Анализ представленных распределений температуры показывает, что опасные температуры достигаются при всех видах лесных пожаров, фронт которых непосредственно воздействует на ограждающую конструкцию деревянного здания. Даже минимальные температуры фронта низового лесного пожара низкой интенсивности при непосредственном контакте с облицовочными материалами могут вызвать воспламенение здания. Максимальные же температуры достигаются в приповерхностном слое облицовочного материала при сценарии воздействия огненного смерча (наиболее опасная разновидность верхового лесного пожара). Ранжирование различных типов лесных пожаров по степени опасности для деревянного здания следующее (от максимального к минимальному): огненный смерч, верховой лесной пожар,

Таблица 7. Исходные данные для численного моделирования
 Table 7. Input data for numerical modelling

Период года Season	Вид пожара Fire type	Материал Material	Облицовочный материал Cladding	Время воздействия, с Exposure time, s	Толщина слоя, м Layer thickness, m
Лето ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$) Summer ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$)	Низовой пожар низкой интенсивности Low-intensity surface fire	Сосна Pine	Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	300	0,5
	Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire				
	Верховой пожар Crown fire				
	Огненный смерч Firestorm				

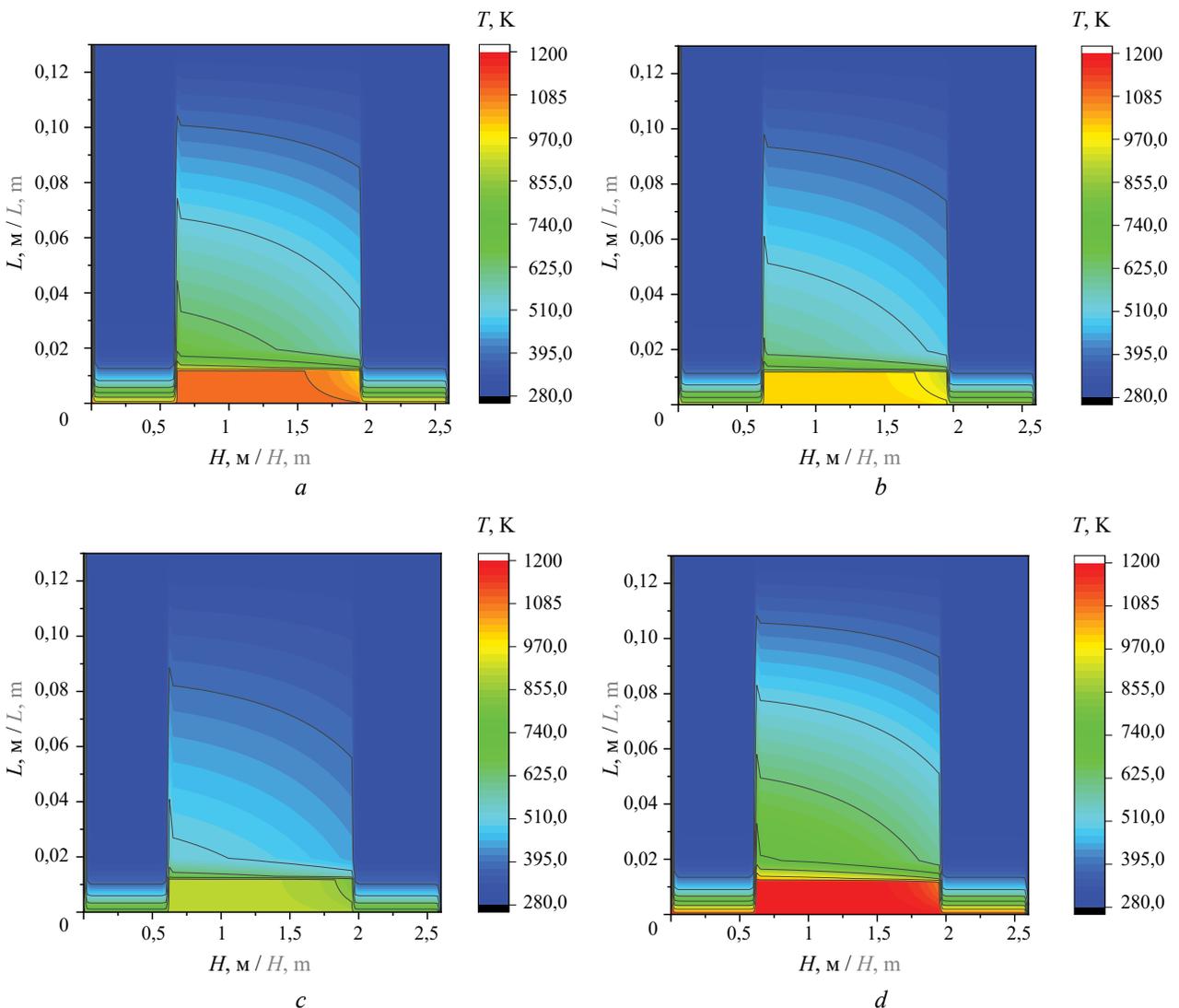


Рис. 4. Распределение температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из древесины сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии воздействия различных видов лесных пожаров (300 с): *a* — верховой пожар; *b* — низовой пожар высокой интенсивности; *c* — низовой пожар низкой интенсивности; *d* — огненный смерч

Fig. 4. Temperature distribution in the layered structure of a wooden structure made of pine wood and siding “log-cabin pine” subjected to exposure of various types of forest fires (300 s): *a* — crown fire; *b* — high-intensity surface fire; *c* — low-intensity surface fire; *d* — firestorm

низовой лесной пожар высокой интенсивности, низовой лесной пожар низкой интенсивности.

В рамках третьего сценария было исследовано воздействие лесного пожара разной продолжительности (на примере низового лесного пожара высокой интенсивности) (табл. 8).

На рис. 5 представлены распределения температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии воздействия низового пожара высокой интенсивности (варьируется время воздействия от 50 до 600 с).

Сравнительный анализ показывает, что с увеличением длительности воздействия лесного пожара на деревянное строение увеличивается температура в приповерхностном слое облицовочного материала. Причем при малых временах воздействия (порядка 50 с) глубина прогрева приповерхностного слоя ограждающей конструкции минимальна. Можно ожидать, что при таких воздействиях на деревоклееные материалы присутствующее в их составе сухое органическое вещество не будет подвергнуто термическому разложению, достаточному для выделения газообразных продуктов пиролиза. При минимальных градиентах температуры в приповерхностном слое минимальной глубины воспламенения материала ограждающей конструкции деревянного здания может и не произойти, и в худшем случае оно будет носить случайный характер. Однако стекло в оконном проеме все равно нагревается до температур, при которых возможно его разрушение. Это может приводить к негативным последствиям для жильцов такого здания. Логично, что длительное воздействие ведет к более глубокому прогреву ограждающей конструкции и максимальным температурам приповерхностного слоя. Поэтому важно обеспечить жилую застройку средствами противопожарной борьбы, которые бы могли быть применены на начальной стадии воздействия лесного пожара. Также следует еще раз указать на необходимость обеспечить отсут-

ствии лесных горючих материалов на территории, примыкающей к деревянному зданию. Такие лесные горючие материалы в условиях приближающегося фронта лесного пожара будут служить проводниками горения. Отдельно следует обсудить опасность оконного проема. Можно рекомендовать оборудовать оконные проемы ставнями, которыми можно было бы закрыть стекло и минимизировать опасность разрушения стекла и проникновения пламени и продуктов сгорания в оконный проем, разрушенный в результате воздействия лесного пожара.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных численных методов [29], а также тестирования разработанного алгоритма и программной реализации на задачах с известным ответом [32]. Кроме того, был проведен анализ сходимости полученных результатов на последовательности сгущающихся сеток по пространству и времени. Результаты численного моделирования с использованием различных сеточных параметров приведены в табл. 9.

Таблица 9. Результаты исследования сходимости алгоритма на последовательности сгущающихся сеток

Table 9. Results of the convergence study of the algorithm on a sequence of refined grids

Номер Number	N	M	dt	T_{ij}	Режим Mode
1	10	10	1	394,60	Неточный Inaccurate
2	100	100	1	392,61	Неточный Inaccurate
3	1000	1000	1	392,89	Достаточный Sufficient
4	10	10	0,1	395,11	Неточный Inaccurate
5	100	100	0,1	392,88	Достаточный Sufficient
6	1000	1000	0,1	393,15	Избыточный Excess
7	10	10	0,01	395,16	Неточный Inaccurate
8	100	100	0,01	392,90	Достаточный Sufficient
9	1000	1000	0,01	393,17	Избыточный Excess
10	10	10	0,001	395,17	Неточный Inaccurate
11	100	100	0,001	392,90	Избыточный Excess
12	1000	1000	0,001	393,17	Избыточный Excess

Таблица 8. Исходные данные для численного моделирования

Период года Season	Вид пожара Fire type	Материал Material	Облицовочный материал Cladding	Время воздействия, с Exposure time, s
Лето ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$) Summer ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$)	Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire	Сосна Pine	Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	50
				150
				300
				450
				600

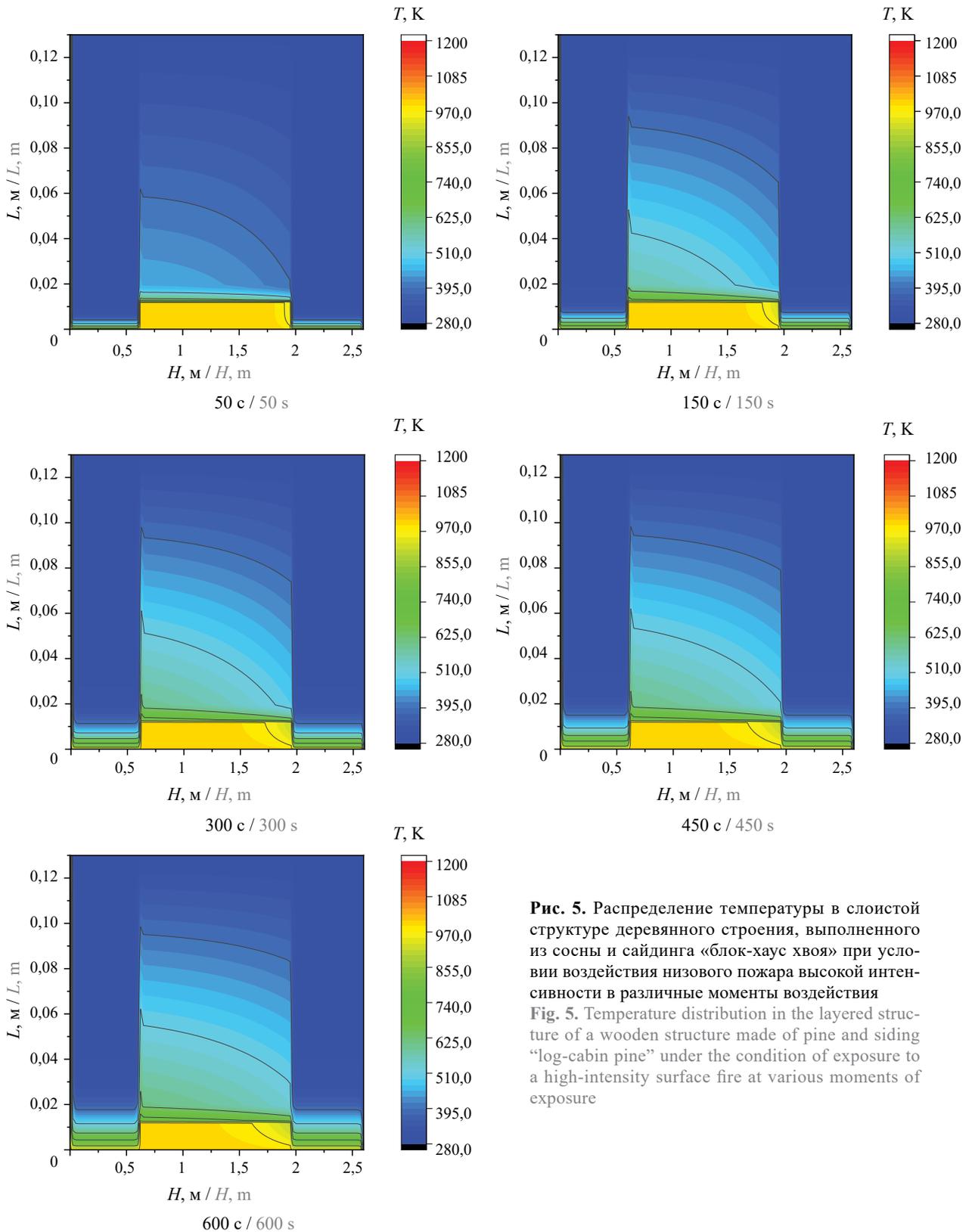


Рис. 5. Распределение температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии воздействия низового пожара высокой интенсивности в различные моменты воздействия
Fig. 5. Temperature distribution in the layered structure of a wooden structure made of pine and siding “log-cabin pine” under the condition of exposure to a high-intensity surface fire at various moments of exposure

Критерием оценки режима моделирования являлась величина разности температур по модулю в контрольной точке для двух разных режимов, характеризующихся заданным количеством узлов по пространству и времени. Результаты моделиро-

вания позволили провести классификацию режимов по шкале: Неточный, Достаточный, Избыточный. Неточный режим характеризовался разницей температур в контрольной точке более 1 К. Достаточный режим характеризовался разницей темпера-

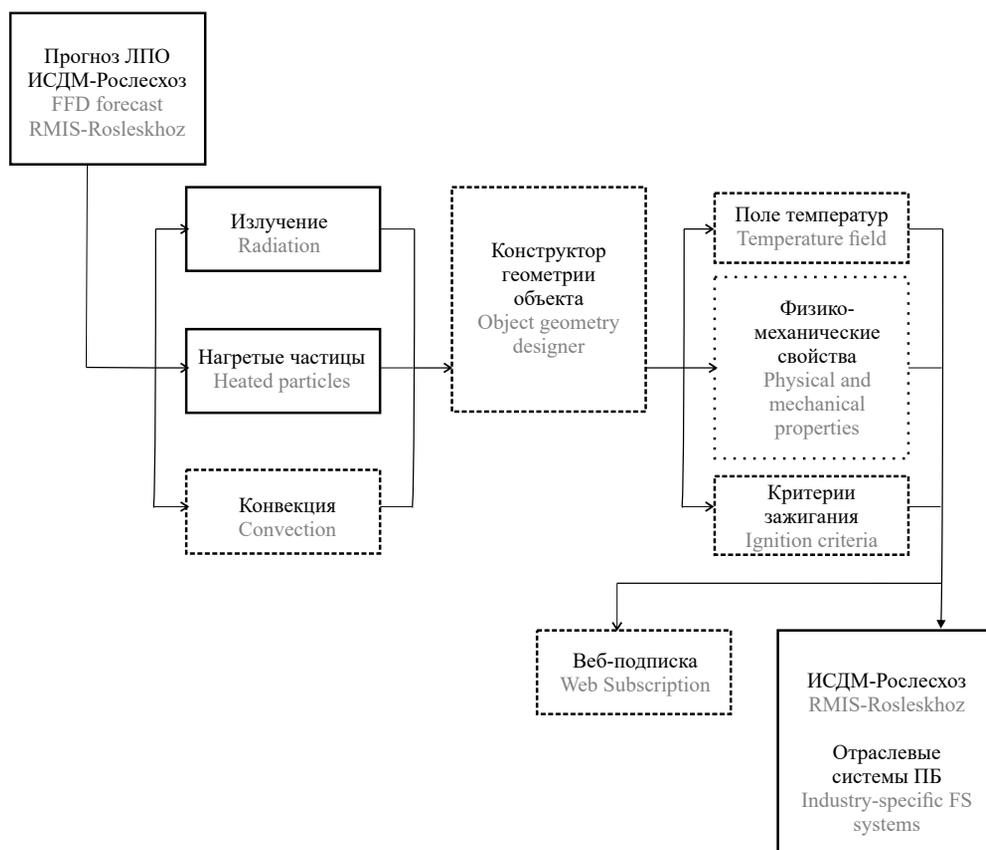


Рис. 6. Структура разрабатываемой информационно-вычислительной системы прогнозирования воздействия лесного пожара на жилые постройки

Fig. 6. Structure of the developed information and computing system for predicting the impact of a forest fire on residential buildings

тур в контрольной точке менее 1 К. Дальнейшие режимы с увеличенным числом узлов расчетной сетки по пространству и/или времени считались избыточными.

В будущих исследованиях целесообразно выполнить моделирование воздействия лесного пожара на реальной территории с учетом расположения объектов, чтобы получить результаты сравнительного анализа теоретических следствий с данными наблюдений и сделать выводы о показателях эксплуатации разработанного программного кода с учетом последствий возникновения реально зафиксированных лесных пожаров. При этом в последующих исследованиях также следует учесть следующие данные для моделирования лесного пожара: расстояние от жилой постройки до лесного массива, интенсивность тепловыделения от кромки лесного пожара, скорость ветра и местные погодные условия и ряд других параметров.

На рис. 6 представлена структурная схема возможного программного продукта для оценки воздействия поражающих факторов лесного пожара на жилые постройки, например, в сельском населенном пункте. Исходные данные по прогнозу лесной пожарной опасности должны поставляться в разрабатываемый программный продукт из Инфор-

мационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров ИСДМ-Рослесхоз. Сплошной границей на рис. 6 обозначены реализованные к настоящему моменту компоненты информационно-вычислительной системы по оценке влияния лесного пожара на жилое помещение. Отрывистой линией обозначены блоки, которые в настоящее время находятся в стадии разработки. Точечной линией обозначены блоки, которые будет также необходимо разработать при реализации будущих исследований. Потребителем прогнозной информации будет та же самая ИСДМ-Рослесхоз или отраслевые системы оценки пожарной безопасности.

Невозможно учесть все факторы в рамках одной статьи. Кроме того, проведение такого комплексного исследования требует также использовать экспериментальные установки. Такое исследование уже запланировано, и выполняются отдельные фрагменты данного большого проекта.

Кроме того, принято решение о разработке отдельного приложения под операционную систему Windows с графическим интерфейсом пользователя. Базовые элементы такого приложения представлены на примере простейшей программной утилиты, которая будет использована как исходная платформа для разработки конечного программного продукта.

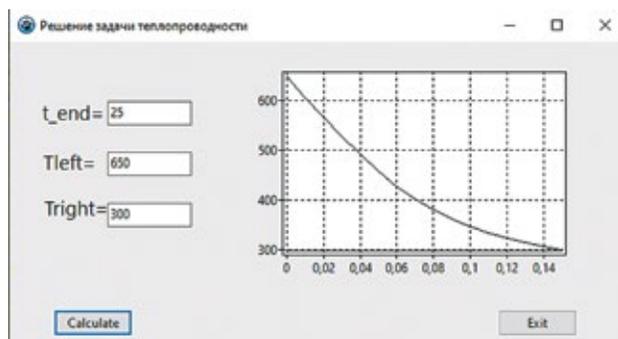


Рис. 7. Прототип графического интерфейса пользователя программного продукта, который предстоит разработать на основе текущих и будущих исследований (типичные элементы управления, ввода исходных данных и визуализации прогнозной информации)

Fig. 7. Prototype of the graphical user interface of the software product to be developed based on current and future studies (typical elements of control, input of initial data and visualization of predicted information)

Типовые элементы будущего приложения представлены на скриншоте работы упрощенного прототипа информационно-вычислительной системы на рис. 7.

В реальном приложении будут учтены и другие теплофизические, физико-химические и физико-механические параметры и процессы. Приложение будет обладать функционалом для ввода исходной информации, анализа данных и визуализации прогнозной информации или генерации файлов результатов, данные из которых могут быть импортированы в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров ИСДМ-Рослесхоз.

Выводы

В результате исследования разработана физико-математическая модель для расчета параметров теплопереноса в ограждающей конструкции сельского здания в условиях воздействия конвективного теплового потока от фронта лесного пожара. Применение предложенной математической модели возможно при разработке специализированного программного обеспечения для оценки пожарной безопасности зданий в сельских населенных пунктах, в том числе с использованием геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования со спутниковых систем оптического диапазона высокого разрешения. Получены основные результаты:

1. Сформулирована детерминированная математическая модель для исследования теплопереноса в элементе ограждающей конструкции сельского здания.
2. Разработана программная реализация указанной математической модели на языке программирования высокого уровня.
3. Получены поля температур в структурно неоднородной ограждающей конструкции с учетом параметров воздействия лесного пожара.
4. Предложена структура разрабатываемой информационно-вычислительной системы оценки влияния лесного пожара на ограждающие конструкции.
5. Предложены компоненты для разработки программного приложения с графическим интерфейсом пользователя.
6. Предложены рекомендации по обеспечению пожарной безопасности здания на территории сельского населенного пункта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V.* Forest fire occurrences and ecological impact prediction : monograph. Novosibirsk : Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2017. 254 p. DOI: 10.15372/FOREST2017BNV
2. *Mell W.E., Manzello S.L., Maranghides A., Butry D., Rehm R.G.* The wildland-urban interface fire problem — current approaches and research needs // *International Journal of Wildland Fire*. 2010. Vol. 19. Pp. 238–251. DOI: 10.1071/WF07131
3. *Baranovskiy N., Malinin A.* Mathematical simulation of forest fire impact on industrial facilities and wood-based buildings // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. No. 13. P. 5475. DOI: 10.3390/su12135475
4. *Craveiro H.D., Fiorini C., Laim L., Guillaume B., Santiago A.* Experimental and numerical evaluation of a wildland-urban interface fire scenario // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 24. P. 13236. DOI: 10.3390/app132413236
5. *Валендик Э.Н., Косов И.В.* Влияние теплового излучения лесного пожара на окружающую среду // *Сибирский экологический журнал*. 2008. № 4. С. 517–523.
6. *Menemenlis D., Palaiologou P., Kalabokidis K.* Wildfire-residential risk analysis using building characteristics and simulations to enhance structural fire resistance in Greece // *Fire*. 2023. Vol. 6. No. 10. P. 403. DOI: 10.3390/fire6100403
7. *Rodriguez-Jimenez F., Fernandes P.M., Fernández-Guisuraga J.M., Alvarez X., Lorenzo H.* Drivers and trends in the size and severity of forest fires endangering WUI areas : a regional case study // *Forests*. 2023. Vol. 14. No. 12. P. 2366. DOI: 10.3390/f14122366
8. *Nowak D.J., Walton J.T.* Projected urban growth (2000–2050) and its estimated impact on the US forest resource // *Journal of Forestry*. 2005. Vol. 103. Pp. 383–389. DOI: 10.1093/jof/103.8.383

9. Aksoy E., Kocer A., Yilmaz İ., Akçal A.N., Akpınar K. Assessing fire risk in wildland–urban interface regions using a machine learning method and GIS data : the example of Istanbul’s European Side // *Fire*. 2023. Vol. 6. P. 408. DOI: 10.3390/fire6100408
10. de la Fuente-Mella H., Elórtégui-Gómez C., Umaña-Hermosilla B., Fonseca-Fuentes M., Ríos-Vásquez G. Stochastic approaches systems to predictive and modeling Chilean wildfires // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. P. 4346. DOI: 10.3390/math11204346
11. Jiao Q., Fan M., Tao J., Wang W., Liu D., Wang P. Forest fire patterns and lightning-caused forest fire detection in Heilongjiang province of china using satellite data // *Fire*. 2023. Vol. 6. P. 166. DOI: 10.3390/fire6040166
12. Arno S.F., Brown J.K. Managing fire in our forests — time for a new alternative // *Journal of Forestry*. 1989. Vol. 87. Pp. 44–46.
13. Bevers M., Omi P.N., Hof J. Random location of fuel treatments in wildland community interfaces : a percolation approach // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34. Pp. 164–173. DOI: 10.1139/X03-204
14. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest fire spread simulation and fire extinguishing visualization research // *Forests*. 2023. Vol. 14. P. 1371. DOI: 10.3390/f14071371
15. Shi Y., Feng C., Zhang L., Huang W., Wang X., Yang S. et al. Characterizing forest fuel properties and potential wildfire dynamics in Xiuwu, Henan, China // *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 7. DOI: 10.3390/fire7010007
16. Xi Z., Chasmer L., Hopkinson C. Delineating and reconstructing 3D forest fuel components and volumes with terrestrial laser scanning // *Remote Sens*. 2023. Vol. 15. P. 4778. DOI: 10.3390/rs15194778
17. Gould N.P., Pomara L.Y., Nepal S., Goodrick S.L., Lee D.C. Mapping firescapes for wild and prescribed fire management : a landscape classification approach // *Land*. 2023. Vol. 12. P. 2180. DOI: 10.3390/land12122180
18. Preisler H., Brillinger D., Burgan R., Benoit J. Probability based models for simulation of wildfire risk // *International Journal of Wildland Fire*. 2004. Vol. 13. Pp. 133–142. DOI: 10.1071/WF02061
19. Pragma, Kumar M., Tiwari A., Majid S.I., Bhadwal S., Sahu N. et al. Integrated spatial analysis of forest fire susceptibility in the Indian Western Himalayas (IWH) using remote sensing and GIS-Based Fuzzy AHP approach // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 4701. DOI: 10.3390/rs15194701
20. Cachim P.B., Franssen J.M. Numerical modelling of timber connection under fire loading using a component model // *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44. Pp. 840–853. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.03.013
21. Regueira R., Guaita M. Numerical simulation of the fire behavior of timber dovetail connections // *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 96. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.12.005
22. Schnabl S., Turk G., Planinc I. Buckling of timber columns exposed to fire // *Fire Safety Journal*. 2011. Vol. 46. Pp. 431–439. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.07.003
23. Ali F., Kavanagh S. Fire resistance of timber columns // *Journal of the Institute of Wood Science*. 2005. Vol. 17. Pp. 85–93.
24. Lie T.T. A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1997. Vol. 4. Pp. 161–169. DOI: 10.1139/177-02
25. Purkiss J.A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Second ed., Elsevier/Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.
26. Baranovskiy N.V., Malinin A.O. Mathematical simulation of heat transfer in the structures of a passenger carriage under the influence of forest fires // *International Review on Modelling and Simulations*. 2021. Vol. 14 (4). Pp. 231–241. DOI: 10.15866/iremos.v14i4.20818
27. Mai Y.W., Jacob L.J.S. Thermal stress fracture of solar control window panes caused by shading of incident radiation // *Materiaux et Construction*. 1980. Vol. 13. Pp. 283–288.
28. Турчин Г.А., Лопота В.А., Абдурахманов А.А., Сысоев В.К. Математическое моделирование нагрева и испарения кварцевого стекла при лазерном синтезе нанопорошков // *Физика и химия обработки материалов*. 2006. С. 49–54.
29. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М. : Эдиториал УРСС, 2003. 784 с.
30. Baranovskiy N.V. Complex three-dimensional mathematical model of the ignition of a coniferous tree via a cloud-to-ground lightning discharge: electrophysical, thermophysical and physico-chemical processes // *Forests*. 2023. Vol. 14. P. 1936. DOI: 10.3390/f14101936
31. Baranovskiy N.V., Podorovskiy A., Malinin A. Parallel implementation of the algorithm to compute forest fire impact on infrastructure facilities of JSC Russian railways // *Algorithms*. 2021. Vol. 14. P. 333. DOI: 10.3390/a14110333
32. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск : Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

REFERENCES

1. Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V. *Forest fire occurrences and ecological impact prediction : monograph*. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2017; 254. DOI: 10.15372/FOREST2017BNV
2. Mell W.E., Manzello S.L., Maranghides A., Butry D., Rehm R.G. The wildland-urban interface fire problem — current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*. 2010; 19:238-251. DOI: 10.1071/WF07131
3. Baranovskiy N., Malinin A. Mathematical simulation of forest fire impact on industrial facilities and wood-based buildings. *Sustainability*. 2020; 12(13):5475. DOI: 10.3390/su12135475
4. Craveiro H.D., Fiorini C., Laím L., Guillaume B., Santiago A. Experimental and numerical evaluation of a wildland–urban interface fire scenario. *Applied Sciences*. 2023; 13(24):13236. DOI: 10.3390/app132413236
5. Valendik E.N., Kosov I.V. The influence of thermal radiation from a forest fire on the environment. *Siberian Ecological Journal*. 2008; 4:517-523. (rus).
6. Menemenlis D., Palaiologou P., Kalabokidis K. Wildfire-residential risk analysis using building characteristics and simulations to enhance structural fire resistance in Greece. *Fire*. 2023; 6(10):403. DOI: 10.3390/fire6100403
7. Rodriguez-Jimenez F., Fernandes P.M., Fernández-Guisuraga J.M., Alvarez X., Lorenzo H. Drivers and trends in the size and severity of forest fires endangering WUI Areas : a regional case study. *Forests*. 2023; 14(12):2366. DOI: 10.3390/f14122366
8. Nowak D.J., Walton J.T. Projected urban growth (2000–2050) and its estimated impact on the US forest resource. *Journal of Forestry*. 2005; 103:383-389. DOI: 10.1093/jof/103.8.383
9. Aksoy E., Kocer A., Yilmaz İ., Akçal A.N., Akpinar K. Assessing fire risk in wildland–urban interface regions using a machine learning method and GIS data : the example of Istanbul’s European Side. *Fire*. 2023; 6:408. DOI: 10.3390/fire6100408
10. de la Fuente-Mella H., Elórtégui-Gómez C., Umaña-Hermosilla B., Fonseca-Fuentes M., Ríos-Vásquez G. Stochastic approaches systems to predictive and modeling Chilean wildfires. *Mathematics*. 2023; 11:4346. DOI: 10.3390/math11204346
11. Jiao Q., Fan M., Tao J., Wang W., Liu D., Wang P. Forest fire patterns and lightning-caused forest fire detection in Heilongjiang province of China using satellite data. *Fire*. 2023; 6:166. DOI: 10.3390/fire6040166
12. Arno S.F., Brown J.K. Managing fire in our forests — time for a new alternative. *Journal of Forestry*. 1989; 87:44-46.
13. Bevers M., Omi P.N., Hof J. Random location of fuel treatments in wildland community interfaces: a percolation approach. *Canadian Journal of Forest Research*. 2004; 34:164-173. DOI: 10.1139/X03-204
14. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest fire spread simulation and fire extinguishing visualization research. *Forests*. 2023; 14:1371. DOI: 10.3390/f14071371
15. Shi Y., Feng C., Zhang L., Huang W., Wang X., Yang S. et al. Characterizing forest fuel properties and potential wildfire dynamics in Xiuwu, Henan, China. *Fire*. 2024; 7:7. DOI: 10.3390/fire7010007
16. Xi Z., Chasmer L., Hopkinson C. Delineating and reconstructing 3D forest fuel components and volumes with terrestrial laser scanning. *Remote Sens*. 2023; 15:4778. DOI: 10.3390/rs15194778
17. Gould N.P., Pomara L.Y., Nepal S., Goodrick S.L., Lee D.C. Mapping firescapes for wild and prescribed fire management: a landscape classification approach. *Land*. 2023; 12:2180. DOI: 10.3390/land12122180
18. Preisler H., Brillinger D., Burgan R., Benoit J. Probability based models for simulation of wildfire risk. *International Journal of Wildland Fire*. 2004; 13:133-142. DOI: 10.1071/WF02061
19. Pragya, Kumar M., Tiwari A., Majid S.I., Bhadwal S., Sahu N. et al. Integrated spatial analysis of forest fire susceptibility in the Indian Western Himalayas (IWH) using remote sensing and GIS-based fuzzy AHP approach. *Remote Sensing*. 2023; 15:4701. DOI: 10.3390/rs15194701
20. Cachim P.B., Franssen J.M. Numerical modelling of timber connection under fire loading using a component model. *Fire Safety Journal*. 2009; 44:840-853. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.03.013
21. Regueira R., Guaita M. Numerical simulation of the fire behavior of timber dovetail connections. *Fire Safety Journal*. 2018; 96:1-12. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.12.005
22. Schnabl S., Turk G., Planinc I. Buckling of timber columns exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2011; 46:431-439. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.07.003
23. Ali F., Kavanagh S. Fire resistance of timber columns. *Journal of the Institute of Wood Science*. 2005; 17:85-93.
24. Lie T.T. A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1997; 4:161-169. DOI: 10.1139/l77-02
25. Purkiss J.A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Second ed., Elsevier/Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.

26. Baranovskiy N.V., Malinin A.O. Mathematical simulation of heat transfer in the structures of a passenger carriage under the influence of forest fires. *International Review on Modelling and Simulations*. 2021; 14(4):231-241. DOI: 10.15866/iremos.v14i4.20818
27. Mai Y.W., Jacob L.J.S. Thermal stress fracture of solar control window panes caused by shading of incident radiation. *Materiaux et Construction*. 1980; 13:283-288.
28. Turichin G.A., Lopota V.A., Abdurakhmanov A.A., Sysoev V.K. Mathematical modeling of heating and evaporation of quartz glass during laser synthesis of nanopowders. *Physics and chemistry of materials processing*. 2006; 49-54. (rus).
29. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Computational heat transfer*. Moscow, Editorial URSS, 2003; 784. (rus).
30. Baranovskiy N.V. Complex three-dimensional mathematical model of the ignition of a coniferous tree via a cloud-to-ground lightning discharge: electrophysical, thermophysical and physico-chemical processes. *Forests*. 2023; 14:1936. DOI: 10.3390/f14101936
31. Baranovskiy N.V., Podorovskiy A., Malinin A. Parallel implementation of the algorithm to compute forest fire impact on infrastructure facilities of JSC Russian railways. *Algorithms*. 2021; 14:333. DOI: 10.3390/a14110333
32. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Difference methods for solving heat conduction problems*. Tomsk, TPU Publishing House, 2007; 172. (rus).

Поступила 14.12.2023, после доработки 15.03.2024;

принята к публикации 22.04.2024

Received December 14, 2023; Received in revised form March 15, 2024;

Accepted April 22, 2024

Информация об авторах

БАРАНОВСКИЙ Николай Викторович, канд. физ.-мат. наук, доцент, Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; Scopus AuthorID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

ГАЛАУТДИНОВА Софья Андреевна, ведущий инженер по учету энергоресурсов, ООО «Томскнефтехим», Россия, 634067, г. Томск, Кузовлевский тракт, 2, стр. 202; ORCID: 0009-0002-1267-438X; e-mail: myazina.sonya@mail.ru

МАЛИНИН Алексей Олегович, аспирант, Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; Scopus AuthorID: 57218138726; ResearcherID: JVN-8309-2024; ORCID: 0009-0002-3242-6543; e-mail: norrischakovich@mail.ru

Вклад авторов:

Барановский Н.В. — концептуализация; методология; руководство; исследование; программное обеспечение; валидация; визуализация; написание — подготовка оригинального проекта; написание — рецензирование и редактирование.

Галаутдинова С.А. — исследование; программное обеспечение; валидация; визуализация; написание — подготовка оригинального проекта.

Малинин А.О. — исследование; программное обеспечение; валидация; визуализация; написание — подготовка оригинального проекта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nikolay V. BARANOVSKIY, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, I.N. Butakov Research Educational Center of School of Energy and Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Av., 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scopus AuthorID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

Sofya A. GALAUTDINOVA, Leading Engineer, Tomskneftekhim Ltd, Kuzovlevskiy Tract, 2, Bldg. 202, Tomsk, 634067, Russian Federation, ORCID: 0009-0002-1267-438X; e-mail: myazina.sonya@mail.ru

Alexey O. MALININ, Postgraduate Student, I.N. Butakov Research Educational Center of School of Energy and Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Av., 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57218138726; ResearcherID: JVN-8309-2024; ORCID: 0009-0002-3242-6543; e-mail: norrischakovich@mail.ru

Contribution of the authors:

Baranovskiy N.V. — conceptualization; methodology; supervision; investigation; software; validation; visualization; writing — original draft preparation; writing — review and editing.

Galautdinova S.A. — investigation; software; validation; visualization; writing — original draft preparation.

Malinin A.O. — investigation; software; validation; visualization; writing — original draft preparation.

Authors not declare conflict of interest.