

УПРОЩЕННАЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ДЕРЕВЯННОГО СТРОЕНИЯ ОТ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Барановский Н.В., Сагалаков А.В.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: firedanger@narod.ru

В настоящей статье представлено новой упрощенной математической модели теплопереноса в ограждающих конструкциях деревянного строения при зажигании от фронта лесного пожара. Рассматривается двумерная математическая модель на базе нестационарных уравнений теплопроводности. Рассматриваются случаи неподвижной и подвижной кромки лесного пожара, излучение от которой действует на поверхность деревянного строения. Используются экспериментальные данные по характеристикам контрольных выжиганий, проведенных в Красноярском крае. В качестве критериев воспламенения древесины использованы литературные экспериментальные данные по критической температуре поверхности зажигания и тепловому потоку к ней от источника нагрева. Разработана программная реализация указанной математической модели, которая может быть использована при модернизации веб-ориентированной геоинформационной системы, предназначенных для анализа горимости лесопокрытых территорий и пожарной безопасности сельских населенных пунктов.

Ключевые слова: лесной пожар, излучение, теплоперенос, строение, зажигание

SIMPLIFIED DETERMINISTIC MATHEMATICAL MODEL OF WOOD BUILDING IGNITION FROM FOREST FIRE FRONT

Baranovskiy N.V., Sagalakov A.V.

National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin avenue, 30), e-mail: firedanger@narod.ru

New simplified mathematical model of heat transfer in protecting designs of a wooden structure at ignition from forest fire front is presented in present paper. The two-dimensional mathematical model on the basis of the non-stationary equations of heat conductivity is considered. Cases of a motionless and mobile edge of forest fire radiation from which operates on a surface of a wooden structure are considered. Experimental data under characteristics control burns, spent in Krasnoyarsk region, are used. Literary experimental data on critical temperature of ignition surface and thermal flux to it from a heating source are used as criteria of wood ignition. Program realization of the specified mathematical model which can be used at modernization of the web-oriented geoinformation system, intended for the analysis of fire severity of forested territories and fire safety of rural settlements is developed.

Keywords: forest fire, radiation, heat transfer, building, ignition

Современные климатические условия характеризуются резкими перепадами температур окружающей среды и неравномерным распределением осадков во времени пожароопасного сезона и по контролируемой территории. Важное значение имеет охрана промышленных объектов от воздействия лесных пожаров [6]. Возможен переход лесного пожара с прилегающей территории на населенный пункт и возникновение в нем пожара (в зарубежной литературе Wildland-Urban Interface Fires [8]). Неблагоприятные климатические условия летом 2010 года обусловили чрезвычайную ситуацию с лесными пожарами в Европейской части России и ряде других регионов (Центральная Россия, Поволжье, Чукотка, Дагестан). В Рязанской области было уничтожено огнем 233 жилых дома, 532 человека остались без крова. В деревнях Передельцы и Требухино не осталось ни одного дома или строения [1]. Следует отметить катастрофический пожар, который перешел с лесной

территории на Лос-Аламосскую Национальную Лабораторию. Экономический ущерб от таких пожаров велик.

Все вышесказанное обуславливает необходимость разработки и практического применения научного подхода к проблеме предупреждения и ликвидации лесных пожаров. Особое внимание необходимо уделять опасности перехода лесных пожаров на близлежащие промышленные объекты.

Помимо инструментальных средств контроля промышленного объекта и сопредельной территории важное значение имеет разработка новых подходов к прогнозированию пожарной безопасности такого объекта на базе технологий математического моделирования и геоинформационного мониторинга [2].

Цель настоящей работы – разработка детерминированной математической модели для оценки параметров воздействия лесного пожара на промышленный объект.

Физико-математическая постановка

Основное допущение в настоящей работе – промышленный объект подвергается воздействию низового лесного пожара (интенсивность пожара может быть сильная, средняя и слабая в зависимости от предполагаемого сценария). Передняя кромка лесного пожара распространяется с малой скорости в условиях отсутствия ветра. Форма кромки лесного пожара в окрестности промышленного объекта может быть описана прямой в силу ее большой протяженности. Передача тепла от кромки пожара осуществляется за счет излучения. Рассматривается сценарий, когда ограждающие конструкции промышленного объекта выполнены из древесины (для определенности из сосновой древесины). В слое ограждающей конструкции преобладает кондуктивный теплоперенос. Влага в приповерхностных слоях ограждающих конструкций отсутствует – рассматривается сценарий катастрофических лесопожарных погодных условий. Основным параметром безопасности промышленного объекта в указанных условиях является установление факта воспламенения (или не воспламенения) ограждающих конструкций промышленного объекта. В качестве критериев воспламенения может быть использован теплофизический подход, описанный в работе [4]. Использование такого подхода апробировано при решении задач прогностического моделирования лесной пожарной опасности [5].

Геометрия области решения с учетом предложенных допущений представлена на рисунке 1. В таблице 1 приведены данные [4], которые могут быть использованы в качестве критериев воспламенения ограждающих конструкций промышленного объекта.

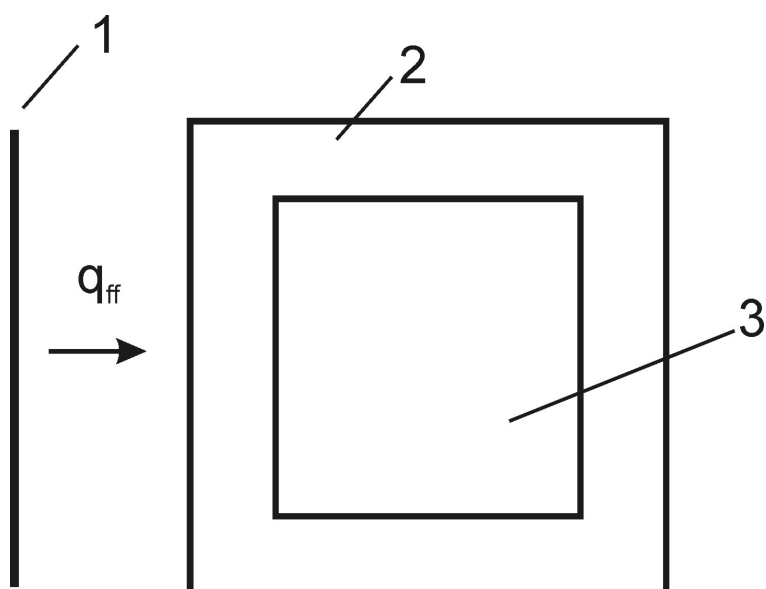


Рис. 1. Геометрия области решения: 1 - кромка лесного пожара, 2 - ограждающие конструкции объекта, 3 – внутреннее пространство объекта, q_{ff} – тепловой поток от кромки лесного пожара

Таблица 1

Экспериментальные данные по условиям зажигания древесины сосны [4]

Время задержки зажигания, с	Тепловой поток, кВт/м ²	Температура поверхности, К
63.5	12.5	658
45.0	21	700
11.1	42	726
2.6	84	773
0.4	210	867

Сформулированная математическая модель (1) – (2) с краевыми и начальными условиями (4) – (8) решена методом конечных разностей. Для решения разностных аналогов одномерных дифференциальных уравнений использовался метод прогонки.

Уравнение теплопроводности для ограждающей конструкции:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \quad (1)$$

Уравнение теплопроводности для внутреннего пространства:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \quad (2)$$

Граничные условия:

На границе воздействия лесного пожара:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = q_{ff} \quad (3)$$

На остальных внешних границах объекта:

$$\alpha(T - T_e) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \quad (4)$$

$$\alpha(T_e - T) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \quad (5)$$

$$\alpha(T_e - T) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \quad (6)$$

На границах двух сред:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad T_1 = T_2 \quad (7)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \quad T_1 = T_2 \quad (8)$$

Начальные условия:

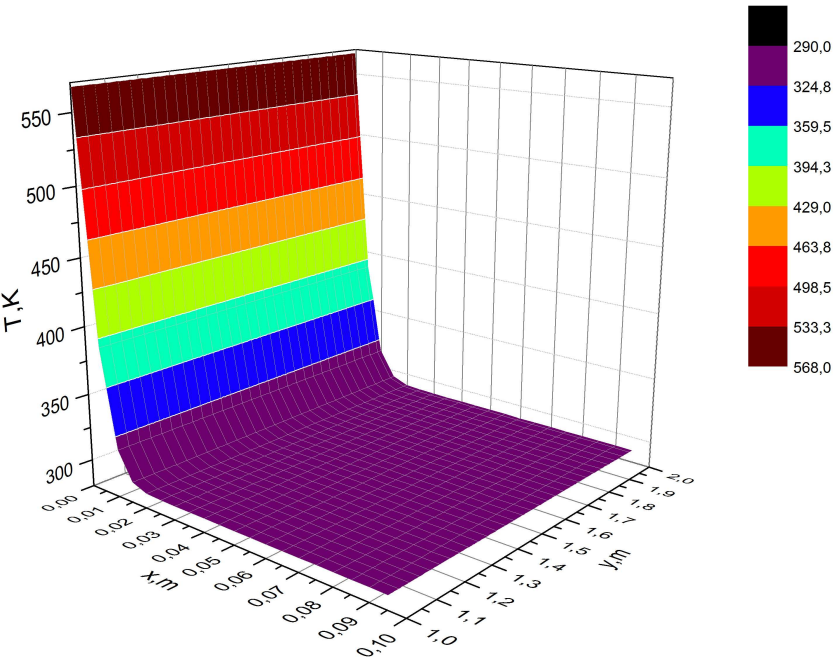
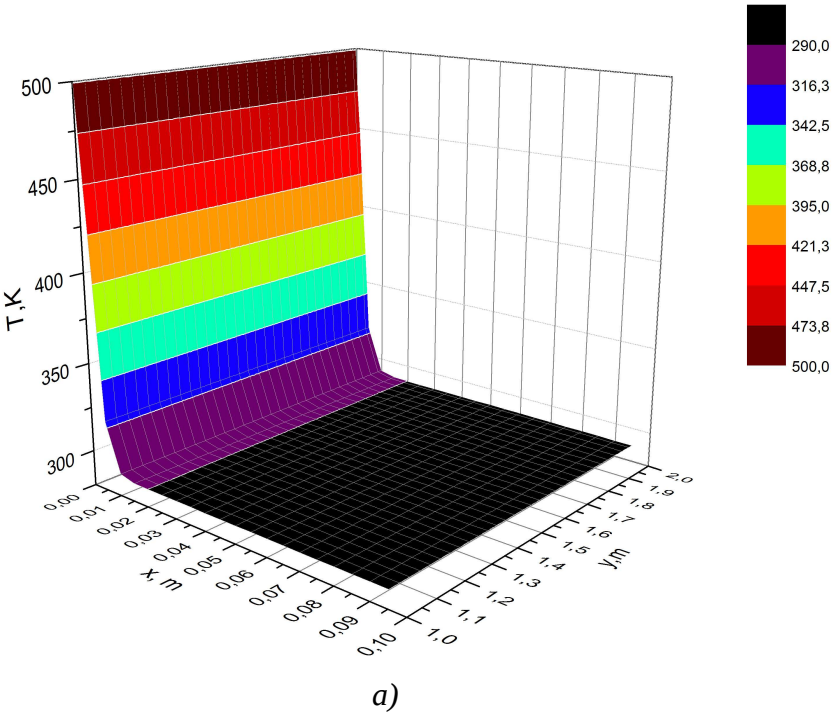
$$t = 0: \quad T_i = T_{i0}, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

Где T_i - температура (1 – ограждающая конструкция, 2 – внутренне пространство объекта), T_e - температура окружающей среды; ρ_i , c_i , λ_i - плотность, теплоемкость и теплопроводность (1 – ограждающая конструкция, 2 – внутренне пространство объекта); t – время; x , y – пространственные координаты; q_{ff} – тепловой поток от кромки лесного пожара.

Результаты и обсуждение

В результате математического моделирования получены поля температур в структуре промышленного объекта. Было исследовано несколько базовых сценариев по влиянию излучения от лесного пожара на промышленную постройку. Во-первых, варьировалась величина плотности теплового потока от фронта низового пожара. Исходными данными послужили результаты экспериментальных выжиганий на специальных площадках Красноярского края [3]. Во-вторых, варьировалось время непрерывного воздействия излучения лесного пожара на промышленную постройку. На рисунках 2 и 3 представлены типичные поля температур в структуре промышленного объекта. Анализ полученных

результатов позволяет сделать вывод, что при низких значениях теплового потока от фронта лесного пожара поверхность ограждающих конструкций не нагревается до критических температур при подходе фронта пожара на расстояние 2-3 метра от промышленного объекта. Следует отметить, что есть корреляция между высотой пламени и тепловым потоком из зоны горения [3]. Чем выше факел пламени, тем больше интенсивность тепловыделения из зоны горения [3]. Для сценария низового лесного пожара высокой интенсивности достижение критических температур [4] наблюдается для вариантов и кратковременного и более длительного воздействия.



б)

Рис. 2. Распределение температуры в промышленном объекте или жилой постройке в различные моменты времени (тепловой поток от фронта пожара 4300 Вт/м²):

а - $t=30$ с; б - $t=120$ с

Анализ распределений температуры по глубине ограждающей конструкции показывает, что до критических температур нагревается поверхностный слой конструкционного материала толщиной примерно 1 – 1,5 сантиметра. Результаты экспериментов с деревянными конструкционными материалами показывает [7], что такой глубины прогрева достаточно для образования необходимого объема газообразных продуктов пиролиза. Эти газы воспламеняются и приводят к возгоранию промышленной постройки. Кроме того, газообразные горючие продукты пиролиза могут воспламениться в результате попаданию нагретой частицы из фронта лесного пожара в зону их смешивания с окислителем.

Были проведены вычислительные эксперименты по оценке влияния скорости распространения фронта лесного пожара. Рассматривался сценарий низового лесного пожара высокой интенсивности, который приближается к промышленному объекту или жилой постройке с постоянной скоростью.

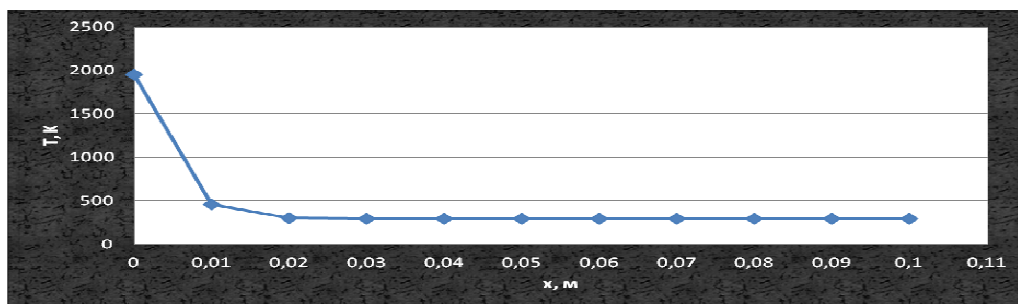


Рис. 3. Распределение температуры в строении при скорости фронта лесного пожара $u=0,5$ м/мин

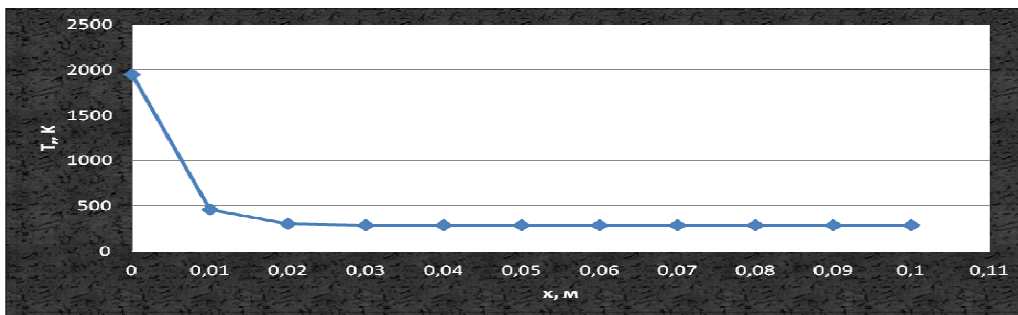


Рис. 4. Распределение температуры в строении при скорости фронта лесного пожара $u=2$ м/мин

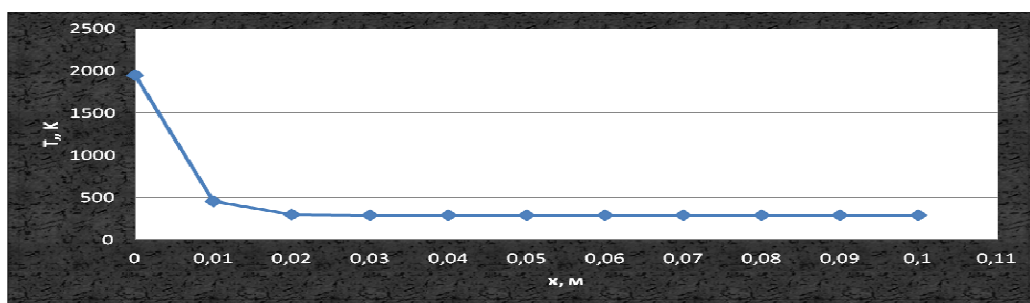


Рис. 5. Распределение температуры в строении при скорости фронта лесного пожара $u=4$ м/мин

Анализ результатов численных расчетов показал слабую зависимость условий зажигания от скорости распространения низового лесного пожара в указанном диапазоне значений ($u=0,5 - 4$ м/мин). Это обстоятельство позволяет использовать приближение неподвижной кромки пожара при сценарных расчетах условий зажигания деревянного строения.

Выводы

В процессе настоящей работы разработана детерминированная математическая модель для оценки параметров воспламенения конструкций промышленного объекта или жилой постройки при воздействии лесного пожара. Математическая модель разработана на основе предложенных допущений. Использование такого математического аппарата может внести значительный вклад в развитие нового поколения геоинформационных систем, включающих программные компоненты для оценки параметров воспламенения построек на территории промышленного объекта или населенного пункта.

Список литературы

1. Абдулалиев Ф.А., Моторыгин Ю.Д. Описание развития пожара с помощью перколяционной модели // Пожаровзрывобезопасность. 2011. № 8. С. 25 – 33.
2. Барановский Н.В., Жарикова М.В. Геоинформационные технологии в прогнозировании пожарной безопасности сельских населенных пунктов // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 11. С. 71 – 80.
3. Валендик Э.Н., Косов И.В. Влияние теплового излучения лесного пожара на окружающую среду // Сибирский экологический журнал. 2008. № 4. С. 517 – 523.
4. Заболотный А.Е., Заболотная М.М., Заболотная Ю.А., Тимошин В.Н. Определение зон безопасного применения твердотопливных генераторов пожаротушащих аэрозолей // Вопросы специального машиностроения. 1995. Вып. 7 – 8. С. 15 – 21.
5. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания дерева

хвойной породы наземным грозовым разрядом // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 3. С. 41 – 45.

6. Михалев Ю.А., Ряполова Л.М. Защита таежных поселков от лесных пожаров // Лесное хозяйство. 2003. № 3. С. 40 – 41.

7. Серков Б.Б., Асеева Р.М., Сивенков А.Б. Физико-химические основы горения и пожарная опасность древесины (часть 2) // Технологии техносферной безопасности. 2012. № 2. С. 1 -21.

8. Fried J.S., Winter G.J., Gilles J.K. Assessing the benefits of reducing fire risk in the Wildland-Urban Interface: A contingent valuation approach // International Journal of Wildland Fire. 1999. Vol. 9. N 1, P. 9 – 19

Рецензенты:

Барахнин В.Б., д.т.н., с.н.с., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск;
Немова Т.Н., д.т.н., профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск.