

неразрывности, уравнение движения и уравнение энергии. При этом, теплофизические условия кориума не изменяются со временем, а конвективные потоки являются ламинарными и двумерными.

Краевая задача математической физики формулируется в безразмерных переменных «функция тока – завихренность». Дифференциальные уравнения решаются численно методом конечных разностей.

В ходе работы получены временные зависимости среднего числа Нуссельта на верхней и нижней стенках полости в диапазоне изменения числа Рэлея от  $10^3$  до  $10^6$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
3. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
4. С.М. Дмитриев, А.В. Морозов, О.В. Ремизов. Способы управления тяжелыми авариями в современных проектах АЭС: Учебное пособие. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2012. – 122 с.

Научный руководитель: А.И. Кудров, старший преподаватель НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЭЛЕМЕНТЕ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА И ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ САЖИ**

В.А. Кириенко  
Томский политехнический университет  
НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-13

Лесные пожары оказывают влияние на состояние здоровья населения и людей, находящихся на лесопокрытых и населенных территориях [1]. Во время пожара продуцируется большое количество различных загрязняющих веществ, в том числе и углеродистых частиц сажи [2]. В результате атмосферного переноса такие частицы могут оказаться в воздухе, что впоследствии может привести к развитию у людей кардиореспираторных заболеваний [3]. Лесной пожар является многостадийным процессом [4], который включает несколько стадий, а именно, 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 лесной пожар продуцирует определенное количество сажевых частиц [5].

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

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. Теплофизические параметры образца не зависели от температуры. Геометрическая постановка задачи приведена на рисунке 1.

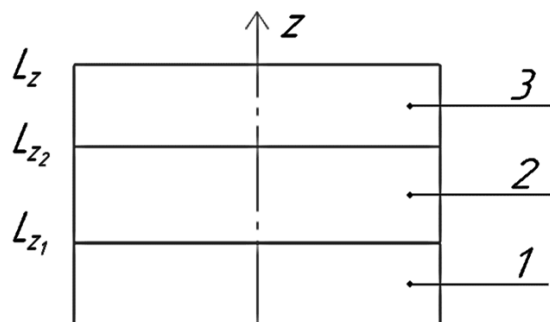


Рис. 1. Геометрическая постановка одномерной задачи теплопередачи в топливном элементе леса: 1 - слой сухого органического вещества; 2 - слой, представляющий смесь сухого органического вещества и воды; 3 - слой сухого органического вещества

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

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - q_p k \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right), \quad (1)$$

$$\rho_i \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -k \rho_i \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) [4], \quad (2)$$

$$\rho_s \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \alpha_s k \rho_s \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) [4], \quad (3)$$

Начальные и граничные условия записывались следующим образом:

$$t = 0; \quad T_i = T_{i0}, \quad (4)$$

$$z = 0; \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \alpha(T_1 - T_{ff}), \quad (5)$$

$$z = L_z; \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha(T_3 - T_{ff}), \quad (6)$$

$$z = L_{z1}; \quad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, T_3 = T_2, \quad (7)$$

$$z = L_{z2}; \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, T_2 = T_1, \quad (8)$$

$$t = 0; \quad \varphi_i = \varphi_{i0}, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^4 \varphi_i = 1 \quad (10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи,  $\alpha_s$  – коэффициент диспергирования,  $c$  – удельная теплоемкость лесного горючего материала,  $E$  – энергия активации пиролиза лесного топлива,  $\varphi_1$  – доля сухого органического вещества,  $\varphi_2$  – доля частиц сажи,  $\varphi_3$  – доля влаги,  $\varphi_4$  – доля газовой фазы,  $k$  – предэкспонента пиролиза лесного горючего материала,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности лесного горючего материала,  $q_p$  – тепловой эффект реакции пиролиза лесного горючего материала,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\rho$  – плотность лесного горючего материала,  $t$  – временная координата,  $T_{ff}$  – температура пламени,  $z$  – пространственная координата.

В настоящей работе использовано уравнение, предложенное в [4]. Следует уточнить, что предлагаемая математическая модель может быть использована для оценки продукции сажевых частиц в процессе пиролиза [5]. Дифференциальные уравнения решались методом конечных разностей. Реализация вычислений осуществлялась с помощью программного пакета RAD Studio. Все графические результаты обрабатывались с помощью программного пакета OriginPro.

В рамках исследования были воссозданы условия, соответствующие наиболее часто встречающихся лесных пожаров (низовые лесные пожары низкой и высокой интенсивности, верховые лесные пожары и огненный шторм). Существуют различия между этими типами лесных пожаров, прежде всего, максимальная температура во фронте лесного пожара, скорость распространения фронта пожара и группа вовлекаемых в горение лесных горючих материалов. Рассмотрим типичные распределения температур и фаз для случая низового пожара низкой интенсивности. На рисунке 2 приведено типичное распределение температур в образце для одного из сезонов года, а рисунок 3 отражает распределения фаз.

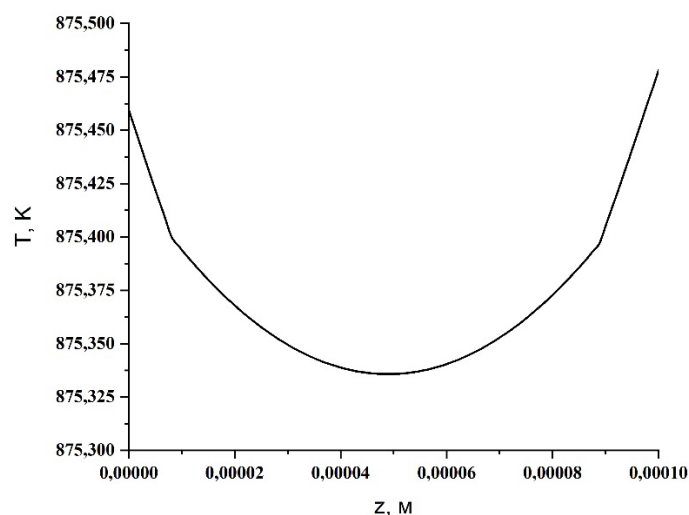


Рис. 2. Распределение температуры по толщине листа березы при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в момент времени  $t=5$  s (лето, июль,  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_{30}=0.4$ )

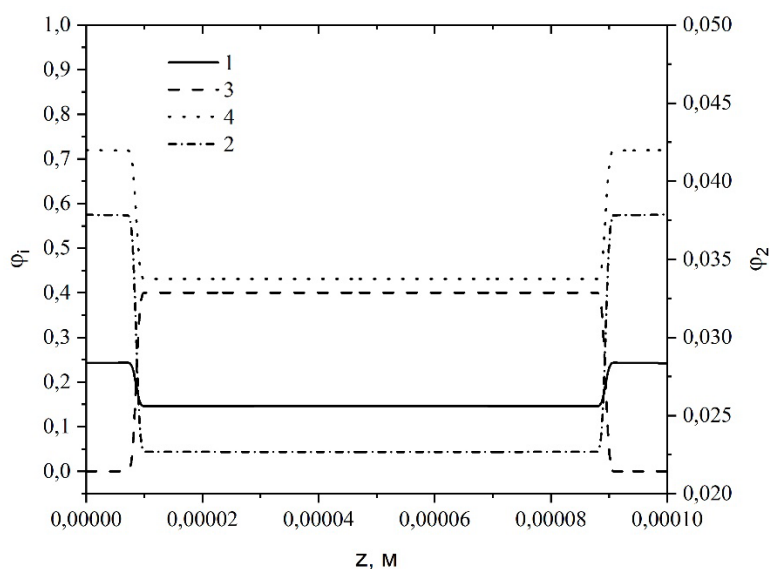


Рис. 3. Распределение объемных долей фаз при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в зависимости от толщины листа в момент времени  $t=5$  s (лето, июль,  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_{30}=0.4$ ,  $\alpha_s=0.05$ ): 1 – сухое органическое вещество, 2 – частицы сажи, 3 – влага, 4 – газ

Анализ температурных распределений показывает, что основное влияние лесного пожара обусловлено длительностью экспозиции элемента лесного горючего материала. 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. Например, разница максимальных температур листа составляет 1 – 6 К в зависимости от периода пожароопасного сезона. Причем, чем меньше время воздействия лесного пожара, тем больше разница в максимальных температурах листа. При анализе фазовых распределений отмечено, что 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. Причем, заметное образование сажевых частиц происходит при времени воздействия более 2 секунд. Максимальное количество сажевых частиц образуется на краях листа, где температура также максимальна, что обуславливает более интенсивное термическое разложение сухого органического вещества.

Таким образом, в настоящей статье предложена математическая модель тепломассопереноса с учетом термического разложения сухого органического вещества и образования сажевых частиц. 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. Предложенная математическая модель может быть применена на практике в целях оценки, мониторинга и прогнозирования экологических последствий лесных пожаров.

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

#### ЛИТЕРАТУРА:

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) DOI: 10.15372/FOREST2017BNV
2. 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, Article N 124760. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124760
3. 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. 9. p. 303-317.
4. Grishin A. M. Mathematical modeling of forest fire and new methods of fighting them. Russia. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. 390 p.
5. Korobeinichev O.P., Paletsky A.A., Gonchikzhapov M.B., Shundrina I.K., Chen H., Liu N. Combustion chemistry and decomposition kinetics of forest fuels // Procedia Engineering, 2013, Vol. 62, pp. 182-193. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.054

Научный руководитель: Н.В. Барановский, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

### **ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ**

Ж.А. Косторева, Д.Ю. Малышев  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И. Н. Бутакова, группа А8-11

Эффективность сжигания древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов во многом определяется технологическим циклом топливосжигания. Одним из важнейших этапов последнего является начало процесса горения – воспламенение.

Анализ наиболее значимых публикаций по проблеме воспламенения частиц древесной биомассы [1-3] показывает, что до настоящего времени не проведено систематических экспериментальных исследований анализа механизма зажигания одиночных частиц древесины. В экспериментах реализованы три варианта расположения частиц (ориентациях направления волокон в пространстве) для 4 видов древесной биомассы (береза, сосна, кедр и осина) сухой ( $\varphi=5-7\%$ ) и