

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЛЕСНОМ ГОРЮЧЕМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФРОНТА НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

В.А. Вяткина

Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-13

Число пожаров и затрагиваемые ими площади увеличиваются с каждым годом. Так, в России за 2021 год лесными пожарами была поражена площадь 18,16 миллион гектаров леса, что является максимальным значением с начала XXI века [1]. Возгорания в лесных массивах несут за собой огромные потери различного плана [2]. В связи с этим большое количество стран по всему миру заинтересованы в борьбе с лесными пожарами с целью сохранения своих лесных массивов. Следует отметить, что основа эффективной технологии предупреждения лесных пожаров являются методы прогнозирования возникновения возгораний. Знания закономерностей физико-химических процессов, протекающих в лесном горючем материале при воздействии высокотемпературной среды позволит улучшить качество прогноза.

Цель исследования – математическое моделирование процессов теплопереноса в лесном горючем материале (березовый лист) при воздействии высокотемпературной среды от фронта лесного пожара.

При разработке математической модели предполагалось, что лист берёзы, попадая в высокотемпературную среду (фронт лесного пожара), далее следует стадия инертного прогрева образца и начинается процесс пиролиза с выделением газообразных продуктов. Не учитывался процесс испарения влаги и зависимость теплофизических параметров от температуры. При моделировании область решения представляла собой трехслойную пластину, в которой первый и третий слой представляли собой сухое органическое вещество, а второй слой являлся смесью сухого органического вещества и воды. Моделирование осуществлялось в рамках двумерной постановки. Рассматривался теплоперенос вдоль осей x и z . Геометрия области решения задачи приведена на рисунке 1.

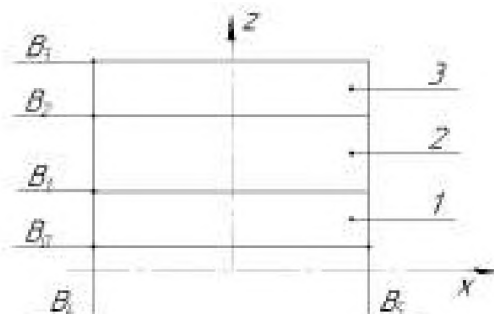


Рис. 1. Геометрическая постановка двумерной задачи теплопереноса в элементе лесного горючего материала: 1 – сухое органическое вещество 2 – смесь сухого органического вещества и воды; 3 – сухое органическое вещество

В ходе математического моделирования осуществлялось решение двумерного уравнения теплопроводности и кинетического уравнения реакции пиролиза:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right) - q_p k_1 \rho_4 \phi_4 \exp \left(-\frac{E_1}{RT_i} \right), \quad (1)$$

$$\rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} = -k_1 \rho_4 \phi_4 \exp \left(-\frac{E_1}{RT_i} \right), \quad (2)$$

Начальные и граничные условия записывались следующим образом:

$$T_i|_{t=0} = T_{i0}, \quad (3)$$

$$\varphi_4|_{t=0} = \varphi_{40}, \quad (4)$$

$$\varphi_5|_{t=0} = \varphi_{50}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=4}^6 \phi_i = 1 \quad (6)$$

$$B_0: -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial z} \right) = \alpha (T_1 - T_f), \quad (7)$$

$$B_1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}; T_1 = T_2, \quad (8)$$

$$B_2: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}; T_2 = T_3, \quad (9)$$

$$B_3: \lambda_3 \left(\frac{\partial T_1}{\partial z} \right) = \alpha (T_3 - T_f), \quad (10)$$

$$B_4: -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \alpha (T_i - T_f), \quad (11)$$

$$B_5: \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \alpha (T_i - T_f), \quad (12)$$

где α – коэффициент теплопередачи, c , λ , ρ – удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность лесного горючего материала соответственно, E – энергия активации пиролиза лесного топлива, φ_4 , φ_5 , φ_6 – доля сухого органического вещества, влаги и газовой фазы соответственно, k – предэкспонента пиролиза лесного горючего материала, q_p – тепловой эффект реакции пиролиза лесного горючего материала, R – универсальная газовая постоянная, T_i – температура i -го слоя, T_f – температура пламени, x, z – пространственные координаты, t – временная координата.

Реализация расчетов проводилась в программе RAD Studio, для решения дифференциальных уравнений использовался метод конечных разностей [3].

На рисунке 2 представлены типичные распределения температур и фаз компонентов в плоскости xz образца при времени экспозиции 3 секунды и температуре пожара 1000 К. Данные условия характерны для низового лесного пожара высокой интенсивности.

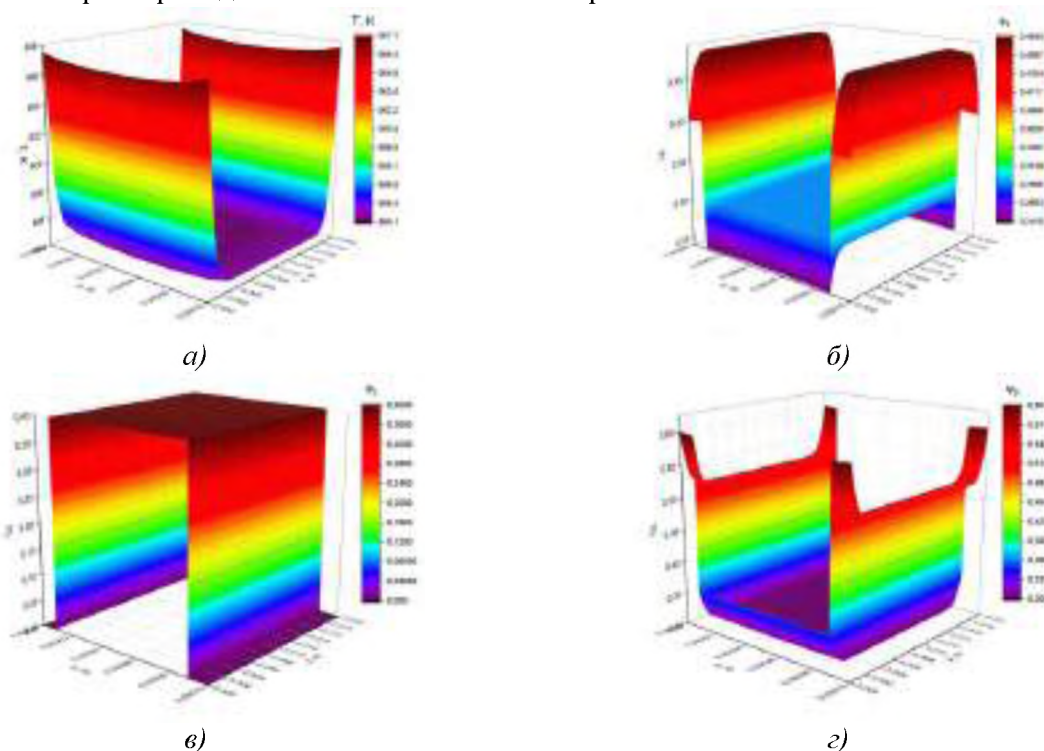


Рис. 2. Температура (а) и объемные доли сухого органического вещества (б), влаги (в) и газа (г) в листовой пластине березового листа ($T_f=1000$ К, $t=3$ с)

На рисунке 2а видно, что температурное распределение имеет области роста. Эти области расположены по бокам листа. Именно здесь, согласно экспериментам, происходит воспламенение листа при воздействии высокотемпературной среды верхового лесного пожара. Анализ распределений температуры показывает, что температура по вертикальному сечению в середине листа соответствует зависимостям, полученным по одномерной постановке. Таким образом, работа вычислительной процедуры проверена на менее сложной математической постановке.

На рисунке 2б представлено распределение объемной доли сухого органического вещества по толщине и длине березового листа. Центральная область, окрашенная в синий цвет, соответствует области листа, насыщенного влагой. В этой области изначально содержание сухого органического вещества меньше, чем в лицевой и тыльной части листа. За период воздействия 3 секунды высокой температуры в лицевой и тыльной части листа объемная доля сухого органического вещества падает с 1 до примерно 0,46–0,47, однако, более значительные уменьшения объемной доли сухого органического вещества наблюдаются вблизи краев листа. Это также подтверждается результатами экспериментов. Именно в этой области образуется достаточное количество газообразных продуктов пиролиза, которые в условиях высокой температуры окисляются кислородом воздуха.

На рисунке 2в представлено распределение объемной доли влаги, которая содержится в структуре березового листа. Эта величина согласно математической модели неизменна в течение высокотемпературного воздействия лесного пожара поскольку испарением влаги в данной модели пренебрегается.

На рисунке 2г представлено распределение объемной доли газовой фазы. Видно, что в углах березового листа образуется максимальное количество газообразных продуктов пиролиза. Теоретические следствия подтверждаются результатами экспериментов, в которых было установлено, что именно здесь происходит воспламенение листа, а, следовательно, и максимальный приток газообразных продуктов пиролиза.

Таким образом, в рамках исследования была разработана двухмерная математическая модель тепломассопереноса в типичном лесном горючем материале (листе березы) с учетом процессов инертного прогрева и пиролиза сухого органического вещества. Полученные двумерные распределения по различным плоскостям образца позволяют получить общее представление о тепломассопереносе в структуре березового листа при высокотемпературном воздействии. Предложенная математическая модель может использоваться для визуализации исходной и выходной информации при оценке, мониторинге и прогнозировании лесных пожаров и их экологических последствий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Официальный сайт ФБУ «Авиалесоохрана» URL: <https://aviales.ru/> (accessed: 24.10.2022).
2. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world/ S.H. Doerr, C. Santín //Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2016. – Vol. 371, No. 1696, P. 20150345.
3. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности. – 2007.

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

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