

# БАЗОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ В СЛОЕ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА

М.Е. Сорокодун  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5БМ4В

Лесные пожары наносят как экономический, социальный, так и экологический ущерб [1]. В последние годы отмечается увеличение частоты пожарных происшествий в лесных массивах как Российской Федерации (Центральная Россия – 2010, Западная Сибирь – 2012, Хакасия, Восточная Сибирь – 2015), так и в других государствах с лесопокрытыми территориями (Южная Европа, США и Австралия).

Анализ пожарных происшествий показывает, что тушение лесных пожаров малоэффективно. Лесные пожары продолжаются до полного выгорания лесного массива или до начала сезона со значительным количеством выпадающих осадков. Это позволяет сделать вывод о том, что необходимо развивать технологии прогнозирования лесных пожаров [2], чтобы иметь возможность предупреждения катастрофических пожарных инцидентов. Все методы и системы прогноза лесных пожаров [1], которые широко применяются в настоящее время, не являются физически обоснованными. Большинство методов основано на анализе статистики по лесопожарной ретроспективы. Например, канадский метод и американская система прогноза лесной пожарной опасности.

Прогнозирование лесной пожарной опасности не возможно без учета и анализа процессов испарения влаги в слое лесного горючего материала (ЛГМ) под воздействием внешних условий [3], например, метеорологических условий. В данной предметной области широкое применение нашел подход математического моделирования сушки слоя ЛГМ, предложенный профессором Томского государственного университета А.М. Гришиным. Однако он не отражает физику процессов испарения влаги в слое ЛГМ и базируется на экспериментах с навесками малого размера.

Цель настоящей работы – разработка базовой математической модели для исследования сушки слоя ЛГМ с учетом продвижения фронта испарения влаги вглубь слоя под воздействием внешних условий.

В настоящей работе предлагается базовая математическая модель для исследования сушки слоя ЛГМ с учетом продвижения фрон-

та испарения вглубь слоя под воздействием внешних условий. Основные допущения, принятые при построении настоящей модели, могут быть сформулированы следующим образом. Слой лесного горючего материала рассматривается в составе двух зон: сухой ЛГМ (по которому уже прошел фронт испарения влаги) и влажный (расположен ниже фронта испарения влаги). Во фронте испарение происходит по закону Кнудсена-Ленгмюра [4]. В качестве типового фактора внешнего воздействия рассматривается лучистый тепловой поток. Соответственно, могут быть выделены два режима сушки слоя ЛГМ: низкотемпературный (при воздействии естественного солнечного излучения) и высокотемпературный (воздействие лучистого теплового потока от фронта лесного пожара или солнечная радиация, прошедшая через концентратор). Теплофизические свойства ЛГМ считаются независимыми от температуры. В структуре ЛГМ выделяют костяк, состоящий из сухого органического вещества и влагу, и воздух в порах между морфологическими элементами слоя ЛГМ.

Математически процесс испарения влаги из слоя ЛГМ описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных (уравнений теплопроводности) с соответствующими начальными и граничными условиями. На границе раздела сухого и влажного слоя лесного горючего материала выставляются модифицированные граничные условия четвертого рода. Ниже представлена геометрия расчетной области решения (рис. 1) и математическая постановка.

## Окружающая среда

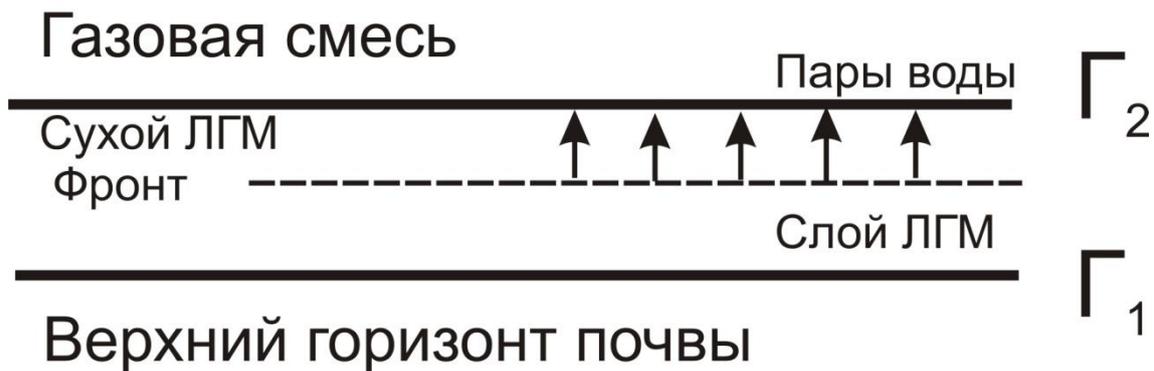


Рис. 1. Геометрия области решения

Уравнение энергии для слоя ЛГМ (сухой)

$$\sum_{i=1}^3 \rho_i c_i \varphi_i \frac{\partial T_d}{\partial t} = \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial^2 T_d}{\partial z^2} + \frac{\partial q_{Rz}}{\partial z}, \quad 0 < z < \xi(t) \quad (1)$$

Уравнение энергии для слоя ЛГМ (влажный)

$$\sum_{i=1}^3 \rho_i c_i \varphi_i \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2}, \lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2 + \lambda_3 \varphi_3, \xi(t) < z < h \quad (2)$$

Параметры газовой фазы соответствуют параметрам водяного пара

$$\rho_3 = \rho_e, \lambda_3 = \lambda_e, c_3 = c_e, \quad (3)$$

Граничные условия

$$z=\Gamma_2 \quad -\lambda_{\text{эф}1} \frac{\partial T_d}{\partial z} = \alpha_e (T_{ea} - T_d), \quad (4)$$

$$T_d = T_w$$

$$z=\xi(t) \quad \lambda_{\text{эф}1} \frac{\partial T_d}{\partial z} = \lambda_{\text{эф}2} \frac{\partial T_w}{\partial z} - q_2 \frac{A(P^u - P)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}} \varphi_2, \quad (5)$$

$$z=\Gamma_1 \quad T_w = T_{es}, \quad (6)$$

Начальные условия

$$T_{es} = 290K, \quad (7)$$

$$T_{ea} = 300K, \quad (8)$$

$$T_d = T_{dн}, \quad (9)$$

$$T_w = T_{wн}, \quad (10)$$

Условные обозначения:

$\rho_i, c_i, \lambda_i, \varphi_i$  – плотность, теплоемкость, теплопроводность и объемная доля ( $i=1$  – сухого органического вещества,  $i=2$  – воды,  $i=3$  – газовой смеси);  $T_d$  – температура сухого слоя ЛГМ;  $T_w$  – температура влажного слоя ЛГМ;  $T_{ea}$  – температура окружающей среды;  $T_{es}$  – температура почвы (верхний горизонт);  $\alpha_e$  – коэффициент теплоотдачи;  $\Gamma_1$  – граница верхний горизонт почвы–слой ЛГМ,  $\Gamma_2$  – граница слой ЛГМ–газовая смесь;  $t$  – время;  $z$  – пространственная координата, отсчитываемая от поверхности слоя ЛГМ;  $q_2$  – тепловой эффект реакции испарения влаги;  $\xi(t)$  – подвижный фронт испарения. Индекс “н” соответствует параметрам в начальный момент времени.

Рассматриваемая система дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями решена методом конечных разностей [5]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использован метод прогонки в сочетании с

методом простой итерации [5]. На рисунке 2 представлено типичное распределение температуры в слое лесного горючего материала.

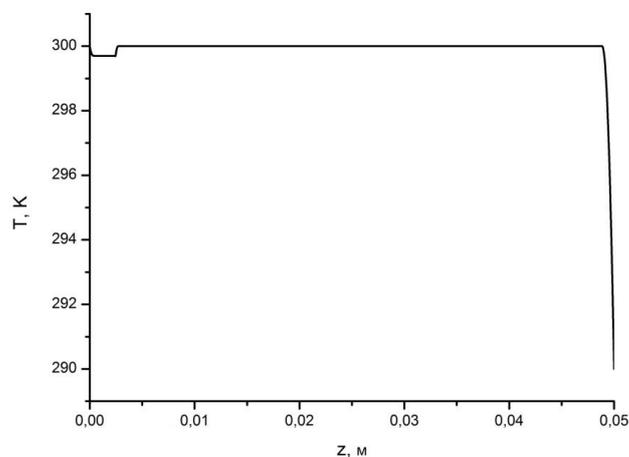


Рис. 2. Типичное распределение температуры в слое лесного горючего материала

Таким образом, в настоящей работе предложена новая базовая математическая модель сушки слоя лесного горючего материала с учетом продвижения фронта испарения влаги вглубь слоя.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 С.
2. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Томский государственный университет. 2007. 153 С.
3. Grishin A.M., Baranovskii N.V. Comparative Analysis of Simple Models of Drying of the Forest Combustibles, Including the Data of Experiments and Natural Observations // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003. V. 76 N 5. P. 166 – 169.
4. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками / Под ред. В.С. Зуева. М.: Машиностроение, 1975. 224 С.
5. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 590 С.

Научный руководитель: Н.В. Барановский, к.ф.-м.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.