

4. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Нагретые до высоких температур частицы металла как источники локальных возгораний жидких веществ // Пожарная безопасность. 2008. № 4. С. 72 – 76.
5. A.V. Zaharevich, V.T. Kuznetsov, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, Combustion, Explosion and Shock Waves, 44, 543 (2008)
6. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание дизельного топлива одиночной “горячей” металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 4. С. 28 – 30.
7. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Механизм зажигания бензина одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 5. С. 39 – 42.
8. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей в плоской постановке // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т.13, № 2. С. 173 – 181.
9. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Дисс. канд. физ.-мат. Наук. Томск: ТГУ, 2007. 153 С
10. A.M. Grishin, V.T. Kuznetsov, A. Skorik, Combustion, Explosion and Shock Waves, 38, 24 (2002)

УДК 533.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПОЧВЫ ПРИ ВЛИЯНИИ ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Барановский Н.В., Ни А.Э.
Томский политехнический университет
E-mail: firedanger@narod.ru

Для исследования пирогенного влияния на почву [2,3] при лесных пожарах разработана математическая модель [1]. Одно из существенных допущений в данной работе является использования одномерной модели. В действительности же рассматриваемый процесс теплопереноса носит пространственный характер.

Помимо теоретических исследований теплового воздействия лесных пожаров на почву существует множество экспериментальных работ [4,5]. Но следует отметить, что такой вид исследования требует значительных ресурсов и времени, а в случае натурного моделирования пожара, путем искусственного выжигания лесного горючего материала (ЛГМ) [6,7], требование к технике безопасности возрастает многократно.

Методам математического моделирования уделяется недостаточно внимания при решении таких задач, как теплоперенос в слоях почвы

при воздействии локальных очагов возгорания. Как показали работы [4,5], численные результаты относительно простых моделей хорошо согласуются с полученными данными в ходе экспериментов.

Целью работы является численное исследование процесса теплопередачи в слоях почвы при воздействии локального очага возгорания в трехмерной постановке.

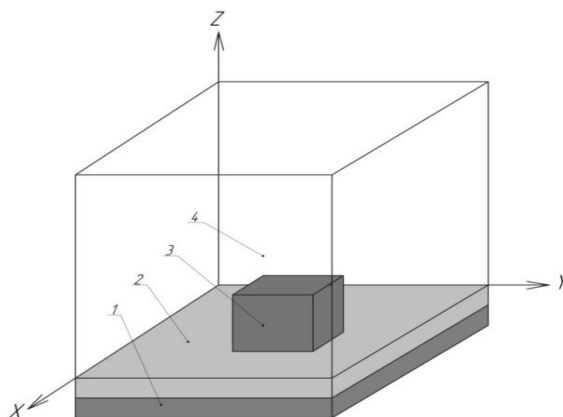


Рис. 1. Схема области решения: 1 – глина, 2 – верхний слой почвы, 3 – ЛГМ, 4 – воздух

Слой почвы рассматривается как двухслойная система [8], в которой могут быть выделены зоны, богатые органикой и глины. Теплопередача в последующие слои в работе учитывается с помощью постановки граничных условий 3-го рода с использованием коэффициента теплопередачи. Полагается, что передача тепла в системе «глина-слой – органики-слой – ЛГМ-воздух» осуществляется только за счет механизма теплопроводности. Рассматривается модельная почва без привязки к конкретному типу почв [9]. Область решения представлена четырьмя слоями: глины, слоя обогащенного органикой, слоя ЛГМ и воздуха над слоем ЛГМ. На границе раздела слоев выставлены граничные условия 4-го рода. На границе расчетной области задаются невозмущенные значения температуры (температуры в глубине почвы и в воздухе соответственно на нижней и верхней границе) с учетом коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи. В слое ЛГМ задана область повышенной температуры, соответствующая очагу возгорания. Для слоя ЛГМ учитывается процесс его термического разложения. Область решения представлена на рис. 1.

В такой постановке исследуемый процесс описывается уравнениями теплопроводности для каждого элемента расчетной области.

Уравнение теплопроводности для слоя глины:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right).$$

Уравнение теплопроводности для слоя почвы, богатого органикой:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right).$$

Уравнение теплопроводности для слоя ЛГМ:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) + q_p k_p \rho_3 \varphi \exp \left(-\frac{E_1}{RT_3} \right)$$

Уравнение теплопроводности для слоя воздуха:

$$\rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right).$$

Кинетическое уравнение для слоя ЛГМ:

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = -k_p \rho_3 \varphi \exp \left(-\frac{E_1}{RT_3} \right).$$

Начальные условия для уравнений (1) - (5):

$$T_1(x, y, z, 0) = T_c; T_2(x, y, z, 0) = T_{ol}; T_3(x, y, z, 0) = T_{ls}; T_4(x, y, z, 0) = T_a; \varphi(0) = \varphi_0.$$

Граничные условия для уравнений (1) - (5):

Внешняя граница воздуха:

$$T = T_{un};$$

Нижняя граница расчетной области:

$$K_1(T_1 - T_b) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}.$$

На границе раздела сред:

$$\begin{cases} T_i = T_j \\ -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x^k} = -\lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x^k}, \text{ где} \end{cases} \begin{cases} i = \overline{1, 4} \\ j = \overline{1, 4} \\ k = \overline{1, 3} \end{cases}$$

где $T_i, \rho_i, c_i, \lambda_i$ – температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность (1 – слой глины, 2 – верхний слой почвы с органическим веществом, 3 – слой ЛГМ, 4 – воздух); q_p – тепловой эффект реакции термического разложения ЛГМ; k_p – предэкспонент реакции термического разложения ЛГМ; E_1 – энергия активации термического разложения ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; φ – объемная доля сухого органического вещества в ЛГМ; K_1 – коэффициент теплопередачи; x, y, z – пространственные координаты. t – временная координата.

Уравнения (1) – (4) с соответствующими начальными и граничными условиями решены методом конечных разностей на равномерной сетке [10]. Для аппроксимации уравнений теплопроводности использована локально одномерная схема А.А. Самарского [10]. Одномерные разностные аналоги решены методом прогонки [10]. Нелинейность в уравнении (3) разрешалась методом простой итерации [10].

Следующие исходные данные были использованы: $\rho_1 = 1330 \text{ кг/м}^3$; $\rho_2 = 1070 \text{ кг/м}^3$; $\rho_3 = 500 \text{ кг/м}^3$; $\rho_4 = 0.03 \text{ кг/м}^3$; $c_1 = 801 \text{ Дж/(кг·К)}$; $c_2 = 976 \text{ Дж/(кг·К)}$; $c_3 = 1400 \text{ Дж/(кг·К)}$; $c_4 = 1200 \text{ Дж/(кг·К)}$; $\lambda_1 = 0.84 \text{ Вт/(м·К)}$; $\lambda_2 = 0.5 \text{ Вт/(м·К)}$; $\lambda_3 = 0.102 \text{ Вт/(м·К)}$; $\lambda_4 = 0.1 \text{ Вт/(м·К)}$; $q_p = 1000 \text{ Дж/кг}$; $k_p = 3.63 \cdot 10^4 \text{ 1/с}$; $E_1/R = 9400 \text{ К}$; $\varphi_0 = 1$; $K_1 = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Типичные результаты численного моделирования представлены на рис. 2. Размерность на координатных осях указана в метрах (без учета масштаба). Значения температуры поверхностного слоев почвы, воздуха задавались на основе справочных данных. В будущем возможно использование более детальных математических моделей учитывающих неравномерные температурные профили в почве по вертикальной координате [11].

Как видно из рис. 2, при таком непродолжительном воздействии очага лесного пожара достоверные различия в температуре почвы заметны на глубине 1-1.5 см от поверхности раздела сред «почва-ЛГМ». В почве в слое богатом органикой на глубине 1 см среда прогревается свыше 100°C и возможно высокотемпературное испарение почвенной влаги. В верхнем сантиметровом слое почвы возможно его обугливание и пиролиз остатков растительности.

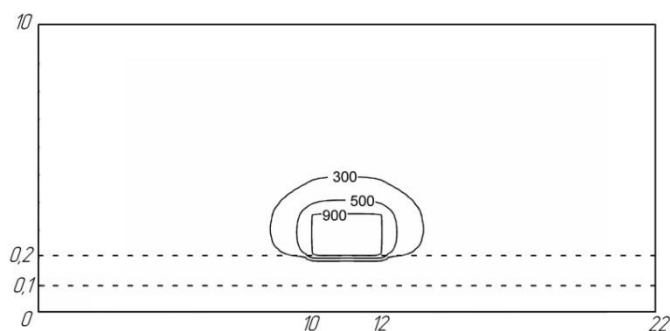


Рис. 2. Распределение температуры в сечении $x=11 \text{ м}$ в течение следующих моментов времени: $t=60 \text{ секунд}$ (а); $t=300 \text{ секунд}$ (б)

При более продолжительном воздействии очага лесного пожара достоверные различия в температуре почвы заметны на глубине 4-5 см от поверхности раздела сред «почва-ЛГМ». В почве в слое богатом органикой на глубине 2-2.5 см среда также прогревается свыше 100°C и

возможно высокотемпературное испарение почвенной влаги. В верхнем двухсантиметровом слое почвы, возможно, его обугливание и интенсивный пиролиз остатков растительности.

Впервые представлена простая трехмерная математическая модель для оценки влияния тепловых режимов лесного пожара на приповерхностный слой почвы. Рассмотрена двухслойная структура почвы. Установлено, что заметные изменения температуры почвы происходят только в слое, богатом органикой. Это будет вести к заметному влиянию на функционирование микробиогеоценозов и свойства почвы.

Список литературы:

1. N.V. Baranovskiy, R.M. Toychuev, *Butlerovskie soobshcheniya*, 34, 136 (2013) (In Russian)
2. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 2007. 153 С.
3. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 С.
4. L. DeBano, *Journal of Hydrology*, 231-232, 195 (2000)
5. T. Iglesias, V. Cala, J. Gonzalez, *The Science of the Total Environment*, 204, 89 (1997)
6. N.V. Baranovskiy, A.V. Zaharevich, V.I. Maksimov, *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 14, 175 (2012)
7. A.V. Zaharevich, N.V. Baranovskiy, V.I. Maksimov, *Ecologicheskie sistemy i pribory*, 7, 18 (2012)
8. C. Matthews, F. Cook, J. Knight, R. Braddock, *Australian Journal of Soil Research*, 43, 945 (2005)
9. Dukarev, *Landscape aspects of taiga soil formation in Western Siberia*. (2005)
10. P. Majumdar, *Computational Methods for Heat and Mass Transfer*. (2005)
11. B. Horton, *Soil Research*, 50, 447 (2012)

УДК 662.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАПЛИ В ПРОЦЕССЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЪЕМА ДОЗИРОВАНИЯ

Батищева К.А., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.
Томский Политехнический университет, Томск
E-mail: author@e-mail.org

Деформация капли на твердой поверхности изучалась авторами [1-3], однако исследования с применением высокоскоростных видеокамер проводились относительно недавно [4]. К настоящему времени отсутствуют модели, позволяющие проводить прогностическую оценку изменения формы капли в условиях свободного падения в зависимости от