

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЛЕСНОМ ГОРЮЧЕМ МАТЕРИАЛЕ

В.А. Вяткина

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

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

В последние десятилетия отмечается тенденция к увеличению как частоты, так и суровости лесных пожаров [1, 2]. Вследствие этого кратно растут как ущербы от этого стихийного бедствия, так и расходы на восстановление лесных массивов [3]. Прогнозирование является одним из наиболее эффективных и перспективных методов борьбы с лесными пожарами. Точный прогноз способствует как возможному предотвращению возгорания, так и перераспределению ресурсов для оперативной ликвидации уже существующих возгораний.

Пожар является сложным процессом, характеризующимся протеканием большого количества физических и химических процессов, что является достаточно трудоёмкой задачей с точки зрения моделирования. В данном случае требуется обработка большого количества разнородных и быстро меняющихся данных. В данном случае целесообразно применение параллельных вычислений для обеспечения проведения расчётов в режиме опережения. Целью исследования являлось численное моделирование процессов теплообмена в типичном лесном горючем материале с применением параллельных вычислений.

При моделировании рассматривались процессы инертного прогрева и пиролиза в типичном для смешанных лесов горючем материале – листе берёзы. Предполагалось, что образец имеет многослойную структуру (рис. 1).

Математическая модель включала себя одномерные уравнения теплопроводности и реакции пиролиза с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - q_p k \rho_4 \phi_4 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \quad (1)$$

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

$$t = 0: T_i = T_0, 0 < z < L_z \quad (3)$$

$$\phi_4|_{t=0} = \phi_{40} \quad (4)$$

$$\phi_5|_{t=0} = \phi_{50} \quad (5)$$

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

$$z = 0: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{\Gamma} = \alpha(T_1 - T_{\Pi}) \quad (7)$$

$$z = L_z: \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{\Gamma} = \alpha(T_3 - T_{\Pi}) \quad (8)$$

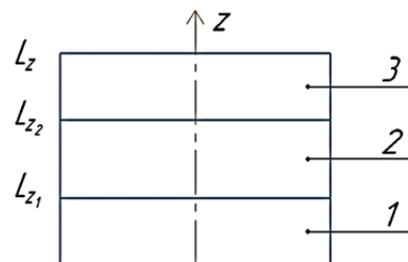


Рис. 1. Область решения задачи:  
1, 3 – сухое органическое вещество;  
2 – смесь сухого органического  
вещества и воды

$$z = L_{z1}: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} |_{\Gamma} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} |_{\Gamma}; T_1 = T_2 \quad (9)$$

$$z = L_{z2}: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} |_{\Gamma} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} |_{\Gamma}; T_2 = T_3 \quad (10)$$

где  $i = 1, 2, 3$  – слои образца,  $i = 4, 5, 6$  – фазы сухого органического вещества, воды и газовых продуктов соответственно,  $\rho$  – плотность,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T_i$  – температура образца в точке  $i$ -го слоя,  $T_n$  – температура пламени  $q_p$  – тепловой эффект реакции пиролиза образца,  $k$  – предэкспонент реакции пиролиза образца,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $E$  – энергия активации реакции пиролиза образца.

Для решения уравнений применялся метод конечных разностей [4]. Дискретизация уравнений проводилась с помощью локально одномерной схемы А.А. Самарского. Программа для реализации расчётов была реализована на высокоуровневом языке Python.

В рамках исследования копии программы с заранее сгенерированными наборами входных данных запускались на различном количестве узлов (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256). В ходе вычислений формировался файл результатов, содержащий значения температур и фаз в каждой точке образца на каждом шаге по времени. Также на основе значения времени, затраченного на выполнение расчётов на каждом количестве узлов, вычислялись значения эффективности и ускорения.

Значение ускорения и эффективности вычислялись по формулам (11) и (12) соответственно [5]:

$$S_M = \frac{T_0}{T_M}, \quad (11)$$

$$E_M = \frac{T_0}{MT_M}. \quad (12)$$

где  $T_0$ ,  $T_M$  – времена выполнения последовательного (вариант без потерь) и параллельного алгоритма соответственно. Теоретическое ускорение считалось равным числу ядер ( $S_M=M$ ).

При моделировании рассматривались четыре основных вида лесных пожаров и три вида пожароопасных сезонов. Учитывалась также влияние теплофизических и термокинетических параметров образца.

Рис. 2, *a* и *б* приведены типичные распределения температур и фаз в листе берёзы, находящемся под воздействием фронта для случая низового лесного пожара в летний период.

На рис. 3, *a* и *б* приведены сравнения теоретических и фактических значений для эффективности и ускорения соответственно.

Полученные температурные и фазовые распределения образца позволяют проводить количественную и качественную оценку изменений параметров в образце. Так, установлено, что основной эффект воздействия на образец обусловлен длительностью пребывания образца во фронте лесного пожара. Максимально количество газообразных продуктов пиролиза образуется на границе контакта с высокотемпературной средой.

Анализ зависимостей, приведённых на рис. 3, показывает, что оптимально использовать 8 узлов для проведения расчётов. В данном случае обеспечивается максимальный прирост в ускорении по сравнению с предыдущим количеством узлов и не наблюдается резкого падения в величине эффективности. Разница между практическими и теоретическими значениями величин обусловлена затратами времени на обмен данными, запуск и завершение процессов.

Таким образом, проведенное математическое моделирование позволяет как выявить основные закономерности поведения образца, так и оценить предстоящие затраты на реализацию таких вычислений. Предложенная математическая модель может быть интегрирована в качестве модуля в более сложные системы прогноза пожарной опасности.

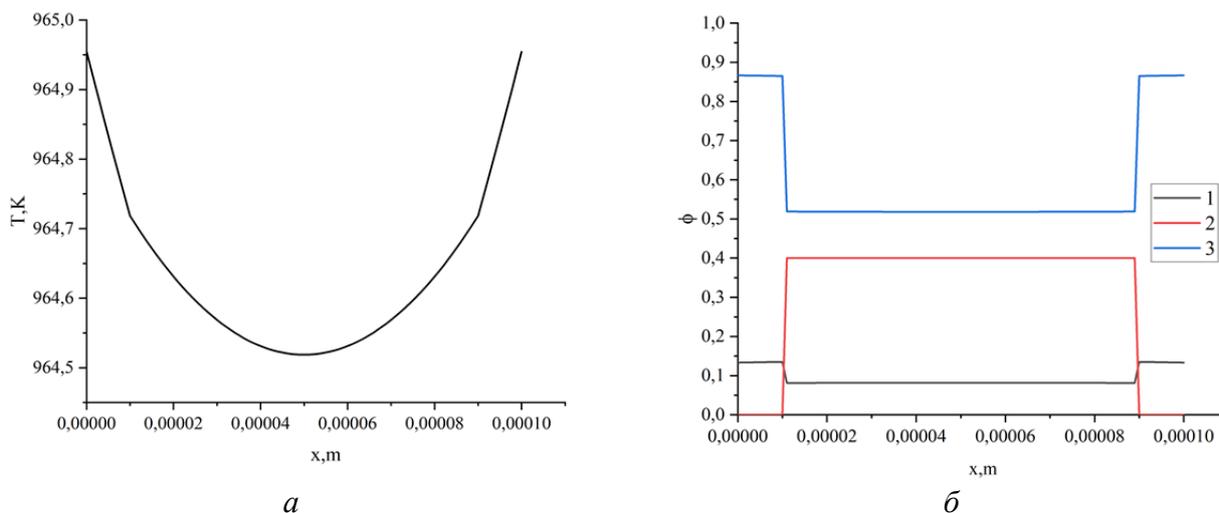


Рис. 2. Распределение температур (а) и объемных долей фаз (б) в образце под воздействием низового лесного пожара низкой интенсивности в момент времени  $t = 2$  с (лето):  
1 – сухое органическое вещество, 2 – влага, 3 – газовая фаза

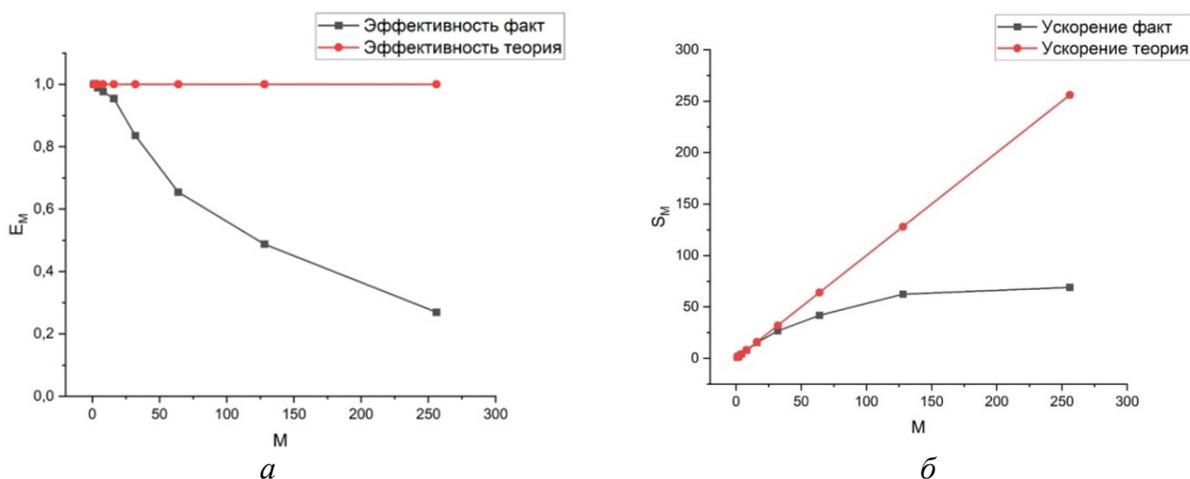


Рис. 3. Зависимость величины эффективности  $E_M$  (а) и ускорения  $S_M$  (б) от числа задействованных в расчетах узлов ( $M$ )

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forest Fire Occurrence, Distribution and Risk Mapping Using Geoinformation Technology: A Case Study in the Sub-Tropical Forest of the Meghalaya, India / T. Dhar, B. Bhatta, S. Aravindan // Remote Sensing Applications: Society and Environment. – 2023. – V. 29. – P. 100883.
2. Fire Severity and Pre-Fire Forest Composition Affect Northern Hawk Owl Presence in Burned Forests in Western North America / K.C. Hannah, J.E. Put; J. Shonfield // Forest Ecology and Management. – 2023. – V. 528. – P. 120632.
3. Константинов А.В., Морковина В.В. Лесные пожары как наиболее значимая угроза экономической безопасности лесного сектора // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т. 4. – № 2. – С. 319–325.
4. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
5. Algorithms for parallelizing a mathematical model of forest fires on supercomputers and theoretical estimates for the efficiency of parallel programs / N.V. Baranovskiy // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. – V. 51. – P. 471–480.