

Национальная академия наук Беларуси
Объединенный институт проблем информатики
Институт математики
Белорусский государственный университет

ТАНАЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Доклады Девятой Международной научной конференции

(Минск, 30 марта 2021 года)

Минск
ОИПИ НАН Беларуси
2021

УДК 519.1; 519.8; 681.3

Танаевские чтения : доклады Девятой Международной научной конференции, Минск, 30 марта 2021 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2021. – 188 с. – ISBN 978-985-7198-06-1.

Представлены доклады Девятой Международной научной конференции «Танаевские чтения» (Минск, 30 марта 2021 г.), посвященной памяти академика Национальной академии наук Беларуси Вячеслава Сергеевича Танаева. Описаны результаты исследований в области теории расписаний, теории графов, оптимизации управления сложными техническими объектами, математического моделирования и проектирования логических схем.

Рекомендованы специалистам в области информатики и ее приложений к проектированию, планированию и управлению в дискретных системах, аспирантам и студентам старших курсов вузов соответствующих специальностей.

Одобрены программным комитетом и печатаются по решению редакционной коллегии Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси в виде, представленном авторами.

Научные редакторы:

кандидат физико-математических наук, доцент Я. М. Шафранский;
член-корреспондент НАН Беларуси, профессор М. Я. Ковалев

ISBN 978-985-7198-06-1

© Объединенный институт
проблем информатики
НАН Беларуси, 2021

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, КОГНИТИВНАЯ ГРАФИКА КАК ОСНОВА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук
Белорусский государственный университет, Минск

Обсуждаются средства и результаты компьютерного моделирования распространения лесных пожаров. Приведена формулировка в двумерной постановке начально-краевой задачи в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Представлены результаты вычислительных экспериментов по изучению динамики зоны горения вблизи полян во фронте, тыле и флангах пожара. Показаны особенности динамики распределений температурного фронта при различных формах полян в зависимости от скорости ветра в пологом леса.

Введение

Лесные пожары наносят значительный материальный и экологический ущерб [1]. Недавним примером являются пожары в Австралии, начавшиеся в сентябре 2019 г. По подсчетам Всемирного фонда дикой природы в них погибло более миллиарда животных. Согласно мнению специалистов центра Moody's Analytics, по состоянию на начало 2020 г. экономический ущерб от лесных пожаров превысит 4,4 млрд долларов США.

Математические модели лесных пожаров разрабатываются с 1940-х гг. до настоящего времени. Есть определенные успехи, но при этом остаются нерешенными ряд вопросов [2].

Математическая модель распространения лесных пожаров

В приведенной ниже математической модели распространения лесных пожаров анализируются изменения распределений следующих величин [3–5]: T – осредненная по высоте слоя лесного горючего материала (ЛГМ) температура в Кельвинах; φ_j , $j = 1, 2, 3, 4$, – объемные доли многофазной реагирующей среды, где φ_1 соответствует сухому органическому веществу лесных горючих материалов, φ_2 – связанной в горючем материале в жидко-капельном состоянии воде, φ_3 – коксикку (конденсированному продукту пиролиза), φ_4 – минеральной части ЛГМ (золе); c_v , $v = 1, 2, 3$, – массовые концентрации компонентов газовой фазы, c_1 соответствует кислороду, c_2 – горючим газам (горючим компонентам продуктов пиролиза), c_3 – смеси остальных газов. В математическом описании учитываются следующие физико-химические процессы: «под-

вод» теплоты в результате конвекции, теплопроводности и излучения, прогрев ЛГМ, их сушка и пиролиз, горение газообразных и твердых продуктов пиролиза. Вывод уравнений, обоснование модели, численная схема и алгоритмы расчетов приведены в публикациях [4–8]. Выбор модели учета турбулентных процессов и пределы применимости модели оговорены в [4, с. 247, 312]. Там отмечается, что использован аналог теории Прандтля, при этом числа Прандтля и Шмидта приняты постоянными. Для определения зависящих от времени и пространственных координат неизвестных функций φ_j , c_v , T формулируется задача:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_1}{\partial t} &= \Phi_{\phi_1}(\phi_1, T), & \frac{\partial \phi_2}{\partial t} &= \Phi_{\phi_2}(\phi_2, T), & \frac{\partial \phi_3}{\partial t} &= \Phi_{\phi_3}(\phi_1, \phi_3, c_1, c_2, T), & \frac{\partial \phi_4}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial t} &= \Phi_{\phi_1}(\phi_1, T), & \frac{\partial \phi_2}{\partial t} &= \Phi_{\phi_2}(\phi_2, T), & \frac{\partial \phi_3}{\partial t} &= \Phi_{\phi_3}(\phi_1, \phi_3, c_1, c_2, T), & \frac{\partial \phi_4}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial c_1}{\partial t} + (V, \text{grad}c_1) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad}c_1) &= \Phi_{c_1}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, c_1, c_2, T), \\ \frac{\partial c_2}{\partial t} + (V, \text{grad}c_2) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad}c_2) &= \Phi_{c_2}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, c_1, c_2, T), \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_5 c_{p5} (V, \text{grad}T) - \text{div}(\lambda_T \text{grad}T)}{\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \phi_j c_{pj}} &= \Phi_T(\phi_1, \phi_2, \phi_3, c_1, c_2, T). \end{aligned}$$

Функции, входящие в записанные уравнения:

$$\begin{aligned} \Phi_{\phi_1}(\phi_1, T) &= -\frac{R_1}{\rho_1}, & \Phi_{\phi_2}(\phi_2, T) &= -\frac{R_2}{\rho_2}, & \Phi_{\phi_3}(\phi_1, \phi_3, c_1, c_2, T) &= \frac{\alpha_c R_1}{\rho_3} - \frac{M_c R_3}{M_1 \rho_3}, \\ \Phi_{c_1}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, c_1, c_2, T) &= \frac{1}{\rho_5} \left(R_{s1} - c_1 Q - \frac{\alpha}{c_{p5} \Delta h} (c_1 - c_{1\infty}) \right), \\ \Phi_{c_2}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, c_1, c_2, T) &= \frac{1}{\rho_5} \left(R_{s2} - c_2 Q - \frac{\alpha}{c_{p5} \Delta h} (c_2 - c_{2\infty}) \right), \\ \Phi_T(\phi_1, \phi_2, \phi_3, c_1, c_2, T) &= \frac{-q_2 R_2 + q_3 R_3 + q_5 R_5 - \frac{\alpha}{\Delta h} (T - T_\infty) - 4\kappa_R \sigma T^4}{\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \phi_j c_{pj}}, \end{aligned}$$

$$\sum_{v=1}^3 c_v = 1, \quad \rho_5 = \frac{\rho_\infty T_\infty}{M_\infty T} \left(\sum_{v=1}^3 \frac{c_v}{M_v} \right)^{-1}, \quad Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3,$$

$$\begin{aligned} R_1 &= k_{01} \rho_1 \phi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), & R_2 &= k_{02} T^{-1/2} \rho_2 \phi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), & R_3 &= k_{03} s_\sigma \phi_3 \rho_3 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right), \\ R_{s1} &= -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2}, & R_{s2} &= (1 - \alpha_c) \nu_r R_1 - R_3, & R_5 &= \rho_5 \min\left(c_2, \frac{M_2}{2M_1} c_2\right) k_{CO} \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right). \end{aligned}$$

Учитываемые в модели величины подробно описаны в [4, 5, 8, 9].

Начальные и граничные условия

Начальные распределения объемных долей, массовых концентраций и температуры задаются во всей области определения решения. Обозначим область моделирования через G , а ее границу через Γ . Область G можно разбить на три подобласти $G = G_{\text{fire}} \cup G_- \cup G_+$. Условимся через G_- обозначать подобласти сгоревших и G_+ – не затронутых пожаром участков, удаленных от очагов горения на достаточное расстояние (эти подобласти характеризуются невозмущенными значениями $c_{1\infty}$, $c_{2\infty}$ и T_∞). Зона горения обозначена G_{fire} . Начальные распределения в зонах «выжженная» G_- и «невыжженная» G_+ задаются следующим образом:

$$T|_{t=0} (G_- \cup G_+) = T_\infty,$$

$$c_1|_{t=0} (G_- \cup G_+) = c_{1\infty}, \quad c_2|_{t=0} (G_- \cup G_+) = c_{2\infty}, \quad c_3|_{t=0} (G_- \cup G_+) = 1 - c_{1\infty} - c_{2\infty},$$

$$\phi_1|_{t=0} (G_+) = \frac{\rho_0}{\rho_1}, \quad \phi_2|_{t=0} (G_+) = (1 - \zeta) W \frac{\rho_0}{\rho_2}, \quad \phi_3|_{t=0} (G_+) = 0, \quad \phi_4 \equiv 0,$$

$$\phi_1|_{t=0} (G_-) = 0, \quad \phi_2|_{t=0} (G_-) = 0, \quad \phi_3|_{t=0} (G_-) = \alpha_c \frac{\rho_0}{\rho_3}.$$

Здесь предполагается, что в G_- ЛГМ полностью сгорели; ρ_0 – плотность типичного слоя ЛГМ, истинные плотности ρ_j ($j = 1, 2, 3, 4$) фаз φ_j , W – влагосодержание слоя ЛГМ и ζ – зольность лесных горючих могут быть неоднородными. Соответствующие распределения в рассматриваемой области моделирования считаются заданными функциями координат.

На границе Γ области моделирования G задаются условия [6]

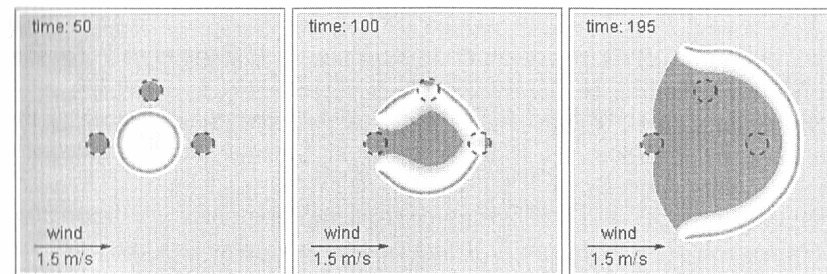
$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_\Gamma = 0, \quad \left. \frac{\partial c_1}{\partial n} \right|_\Gamma = 0, \quad \left. \frac{\partial c_2}{\partial n} \right|_\Gamma = 0.$$

Программный комплекс расчета динамики лесного пожара

Система дифференциальных уравнений решалась численно. Применялись явные разностные схемы с равномерной сеткой по пространству и переменным временным шагом по времени. Текущие значения временного шага уточнялись из условий устойчивости численной схемы [5, 8, 10] с учетом динамики фронта и скоростей протекания процессов.

Вычислительные эксперименты реализованы в многофункциональном интерактивном программном комплексе, разработанном на языке Wolfram Language в системе компьютерной алгебры *Mathematica* [11]. Важными моментами организации вычислений являются: используемый дополнительный инструментарий, обеспечивающий интеллектуальный анализ получаемых решений; включенные в комплекс специальные средства протоколирования результатов; инструменты «ручной» коррекции параметров расчетной сетки; набор функций когнитивной графической визуализации; возможности пересчета для любого временного интервала на другой пространственной сетке. Соответствующие методические и технические решения поясняются отдельно. Необходимость адаптации хода вычислений (включая пространственную сетку, временной шаг) обусловлена длительностью расчетов каждого конкретного варианта, а «вмешательство» анализирующего промежуточные результаты специалиста, его выполняемые специально разработанными средствами уточнения числа расчетных узлов позволяют сократить ненужные пересчеты на отдельных участках.

Для примера приведем решение модельной задачи распространения низового лесного пожара в области 20 на 20 м. Изучается динамика пожара на площади, когда в центре области моделирования (в начале координат) возникает и начинает распространяться очаг горения. При этом по направлению ветра, против ветра и перпендикулярно ветру (на одном из флангов) имеются участки с отсутствием горючей растительности (поляны) [12]. Авторы предполагают сделать видеопрезентации решений для различных форм поляны, а именно кругов, квадратов [13], прямоугольников. На рисунке приводятся иллюстрации одного из расчетов при равновесной скорости ветра на середине высоты пламени 1,5 м/с в варианте геометрии поляны в форме круга. Цветом в оттенках зеленого показана площадь незатронутых пожаром лесных горючих материалов, коричневым – участки с полным их отсутствием (поляны или уже сгоревший лес). Цветовым градиентом отображаются карты плотности распределения температуры в фронте горения.



Распространение пожара для случая поляны в виде кругов

Наблюдается следующее поведение. Сначала зона контура пожара «разрывается», встретившись с полянами. Далее пожар «огихает» поляны. По направлению против ветра распространение пожара прекращается. В направлении по ветру и перпендикулярно ветру разорванные контуры пожара вновь «смыкаются» и зона пожара распространяется единым фронтом.

Список литературы

1. Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone / A. A. Dvornik [et al.] // *Aerosol Science and Technology*. – 2018. – Vol. 52, no. 8. – P. 923–932. DOI: 10.1080/02786826.2018.1482408
2. Баровик, Д. В. Состояние проблемы и результаты компьютерного прогнозирования распространения лесных пожаров / Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук // *Вестник БГУ. Сер. 1*. – 2011. – № 3. – С. 78–84.
3. Баровик, Д. В. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров / Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук // *Вестник ПГУ. Сер. С : Фундаментальные науки*. – 2011. – № 12. – С. 51–56.
4. Гришин, А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А. М. Гришин. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1992. – 408 с.
5. Barovik, D. Mathematical modelling of running crown forest fires / D. Barovik, V. Taranchuk // *Mathematical Modelling and Analysis*. – 2010. – no. 15(2). – P.161–174.
6. Баровик, Д. В. Численная реализация математической модели верховых лесных пожаров / Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук // *Весті БДПУ. Сер. 3*. – 2010. – № 2 (64). – С. 40–44.
7. Баровик, Д. В. Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров / Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук // *Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика*. 2010. – № 1. – С. 138–143.

8. Баровик, Д. В. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров / Д. В. Баровик, В. И. Корзюк, В. Б. Таранчук // Тр. Института математики. – 2013. – № 21(1). – С. 3–15.

9. Баровик, Д. В. О корректности одной математической модели низовых лесных пожаров / Д. В. Баровик, В. И. Корзюк, В. Б. Таранчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2013. – № 57(4). – С. 5–9.

10. Таранчук, В. Б. Компьютерное моделирование лесных пожаров / В. Б. Таранчук, Д. В. Баровик // Наука, инновации, инвестиции : сб. материалов Второго Белорусско-Латвийского форума. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 73–75.

11. Таранчук, В. Б. Основы программирования на языке Wolfram: учеб. материалы для студентов фак. прикладной математики и информатики спец. 1-31 03 04 «Информатика» / В. Б. Таранчук. – Минск : БГУ, 2015. – 49 с.

12. Taranchuk, V. Numerical Modelling of Surface Forest Fire Spread in Nonuniform Woodland / V. Taranchuk, D. Barovik // Computer Algebra Systems in Teaching and Research. – 2019. – Vol. VIII. – P. 159–168.

13. Баровик, Д. В. Моделирование процессов распространения низовых лесных пожаров при наличии полян на пути огня / Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук // Математические методы в технике и технологиях. – 2017. – Т. 12, ч. 1. – С. 109–113.