

УДК 630\*432.31:658.012.12

*С.В. УШАНОВ, Г.А. ДОРРЕР, Н.Г. БАРХАТОВ*

Сибирский государственный технологический университет

Ушанов Сергей Викторович родился в 1950 г., окончил в 1972 г. Сибирский технологический институт, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики и информатики Сибирского государственного технологического университета. Имеет около 90 печатных работ в области информатики и технической кибернетики, моделирования процессов управления лесными пожарами.



Доррер Георгий Алексеевич родился в 1936 г., окончил в 1960 г. Ленинградский кораблестроительный институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системотехники Сибирского государственного технологического университета. Имеет более 100 печатных работ по проблеме математического моделирования процессов распространения лесных пожаров и созданию компьютерных систем управления по борьбе с ними.



Бархатов Николай Геннадьевич родился в 1973 г., окончил в 1995 г. Красноярскую государственную технологическую академию, инженер-программист. Имеет около 10 печатных работ.



## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И БОРЬБЫ С НИМИ\***

Рассмотрены проблемы математического моделирования процессов распространения лесных пожаров, их локализации и безопасного вывода людей и техники. Представлена модель локализации лесных пожаров. Приведен комплекс программных средств для решения поставленных задач.

\* Работа выполнена при поддержке Красноярского фонда науки, грант 4F0230.

The problems of mathematical simulation of forest fires spreading, their localization and safe evacuation of people and machinery are considered. The model of localization of forest fires is presented. The complex of software is given for finding suitable solutions for the problems put.

Лесные пожары (ЛП) – одно из наиболее опасных для природы и человека стихийных бедствий. В настоящее время в России ведется интенсивная разработка компьютерных систем управления охраной лесов от пожаров. В основном сформирована система управления федерального уровня, внедряются системы управления на территориальных авиабазах. Значительные интернациональные усилия направлены на изучение проблем охраны от пожаров бореальных лесов Евразии [11].

Анализ действий по тушению крупных ЛП показал, что успех борьбы с ними зависит не только от количества технических средств и людских ресурсов, но в основном от рациональной их организации и правильной тактики тушения. Последняя определяется характером лесорастительных условий, топографией местности, особенностями распространения и развития ЛП. Недостаток сил и средств для ликвидации ЛП компенсируется их маневрированием [11].

Внедрение в практику борьбы с ЛП современных средств обнаружения, методов прогнозирования их распространения и развития, математического моделирования и теории управления дает возможность обоснованного планирования борьбы с ЛП и применения новых тактических приемов [11]. Важную роль при этом могут играть экспертные системы, предназначенные для сбора и кодирования знаний в конкретной предметной области, а затем использующие эти знания в форме, моделирующей принятие решения человеком [8].

В настоящей статье кратко рассмотрены методология и некоторые итоги работ по проблеме моделирования процессов распространения и ликвидации лесных пожаров, которые выполнены авторами в 1980–1996 гг. в Сибирском государственном технологическом университете в сотрудничестве с Институтом леса СО РАН и Центральной базой авиационной охраны лесов.

Математическое моделирование процесса распространения ЛП. В основу математических моделей объекта управления положена математическая теория развития лесных пожаров [3–5, 12].

Контур лесного пожара является основным параметром, от которого зависит тактика борьбы с огнем и общий объем работ по его ликвидации [4]. В настоящей работе мы ограничиваемся феноменологической моделью. Будем считать лесной пожар подвижной областью на картографической плоскости  $D$  с декартовыми координатами  $X_1$  и  $X_2$ , которые рассматриваются как вектор  $X = (X_1, X_2)^T$  ( $T$  – знак транспонирования). Граница этой подвижной области (контур пожара) в общем виде может быть описана уравнением  $G(X, t) = 0$ , которое можно принять за уравнение изохрон, или линий уровня на плоскости.

Предположив, что контур ЛП – замкнутая гладкая линия при любом  $t$ , из условия неразрывности контура получим уравнение его движения

$$\frac{\partial G}{\partial t} + V^T \text{grad}(G) = 0, \quad (1)$$

где  $V(X, t)$  – вектор скорости контура ЛП, определяемый отдельной моделью [4, 12].

Уравнение движения контура (1) должно дополняться начальным условием  $G(X(t_n), t_n) = 0$ , определяющим контур ЛП в некоторый начальный момент времени  $t_n$  (например момент обнаружения пожара или начала его локализации).

Рассмотрим основные подходы к моделированию контура лесного пожара.

Первый подход связан с получением общих математических моделей, в рамках которых могут быть предсказаны все характеристики (контур, поля температур, концентраций и скоростей) во фронте и в зоне ЛП [3]. Эти модели содержат систему уравнений и граничных условий, описывающих трехмерные процессы тепло- и массообмена, фазовых и химических превращений при горении, а также движение газовых потоков, вызванных этими процессами. Контур ЛП определяется изотермой поля температур в газовой фазе, которая соответствует температуре горения [3].

Ограничением использования подробных физических моделей в системах оперативного прогнозирования распространения ЛП являются приближенные знания условий горения и теплофизических характеристик лесных горючих материалов (ЛГМ) [4].

Второй подход связан с использованием для расчета кромки упрощенных феноменологических моделей [4, 12]. Они позволяют непосредственно рассчитывать скорость  $V(X, t)$ . Большинство известных в настоящее время моделей скорости распространения используют экспериментально-аналитические и экспериментально-статистические подходы [4] и учитывают теплофизические свойства и запас ЛГМ, направление и скорость ветра, топографию местности. Феноменологические модели позволяют оценить параметры, важные для расчета предельно допустимых расстояний от низовых и верховых ЛП при их локализации и определения ширины заградительной полосы, влияющей на скорость локализации.

В [5] предложена математическая модель развития ЛП, промежуточная между подробными физическими и феноменологическими моделями. В ней учитывается уравнение теплового баланса в твердой фазе горючего в слое ЛГМ, а тепловое воздействие локального пламени на близлежащие слои горючего вводится на основе экспериментальных данных. Модель позволяет учитывать переходы фронта ЛП через разрывы в слое горючего, взаимодействие процессов горения различных слоев ЛГМ. Как и в случае общих математических моделей, допустимая для локализации область может быть определена изотермой, соответствующей предельно допустимой температуре.

Математическое моделирование процессов локализации ЛП. Рекомендации по локализации ЛП в значительной мере носят эмпирический характер, а качество решений существенно зависит от опыта тех, кто их принимает. Применение математического моделирования и современной теории управления при решении задач локализации лесных пожаров повышает обоснованность решений, ориентированных в первую очередь на помощь низовым уровням борьбы с ЛП (персонал оперативных отделений и руководителей тушения крупных пожаров).

Рассмотрим систему управления, объектом которого является лесной пожар, а субъектом противопожарные силы и средства.

Процессы распространения и локализации ЛП рассматриваются совместно в декартовой системе координат  $X = (X_1, X_2)^T$ . Это дает возможность описывать контуры произвольной формы и снять ограничения, принятые в [7, 9, 10]. Локализация ЛП осуществляется созданием заградительных полос.

Качество системы управления определяется функционалом, который характеризует обобщенные затраты на борьбу с ЛП и учитывает затраты, пропорциональные времени локализации ( $\Delta P_T$ ), площади ЛП ( $\Delta P_S$ ) и длине заградительной полосы ( $\Delta P_L$ ).

$$J = \int_{T_0}^T (\Delta P_T + \Delta P_S + \Delta P_L) dt, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= C_1(X, t); \\ \Delta P_S &= a C_2(X, t) \left( \frac{dX_2}{dt} (X_{01} - X_1) + \frac{dX_1}{dt} (X_{02} - X_2) \right); \\ \Delta P_L &= C_3(X, t) \sqrt{\left( \frac{dX_1}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dX_2}{dt} \right)^2}; \end{aligned}$$

$X(t) = (X_1(t), X_2(t))^T$  – координаты подвижного конца заградительной полосы в момент времени  $t$ ;

$T_0, T$  – время начала и окончания процесса локализации ЛП;

$X_0 = (X_{01}, X_{02})^T$  – координаты центра ЛП;

$a$  – коэффициент, определяющий направление локализации относительно  $X_0$  ( $a = 1$  при локализации по часовой стрелке;  $a = -1$  при локализации против часовой стрелки).

Система ограничений учитывает: предельную скорость локализации

$$\frac{dX}{dt} = u(t); \quad \|u(t)\| \leq U(X, t); \quad (3)$$

направление обхода ЛП при локализации относительно центра ЛП

$$a \left( \frac{dX_2}{dt} (X_{01} - X_1) + \frac{dX_1}{dt} (X_2 - X_{02}) \right) \geq 0; \quad (4)$$

минимальное расстояние от заградительной полосы до кромки лесного пожара при локализации

$$X(t) = \{x(t) : F_1(t, x(t), h) \geq 0\}, \quad (5)$$

где  $u(t) = (u_1(t), u_2(t))^T$  – вектор скорости процесса локализации;

$\|u(t)\| = \sqrt{u_1(t)^2 + u_2(t)^2}$  – длина вектора скорости;

$U(X, t)$  – максимально возможное значение скорости локализации;

$F_1(t, x(t), h) = 0$  – уравнение, определяющее множество точек  $x(t)$ , отстоящих на предельно допустимом расстоянии  $h$  от кромки ЛП.

Моделирование управляющей системы проводится на основе теории локализационного управления [7, 9–11]. Поставленные задачи решаются методами оптимального управления.

В ряде случаев возникает необходимость в определении наиболее неблагоприятного сценария развития ЛП. При этом задачи локализации, вывода сил и средств представляют собой антагонистическую игру с природой и могут решаться методами теории динамических игр [2].

Математическое моделирование процессов безопасного вывода сил и средств из зоны действия ЛП. Лесной пожар представляет не только опосредованную экологическую угрозу для человека, но и прямую угрозу для жизни людей, оказавшихся в зоне его действия. Причинами гибели людей являются: недостаточный прогноз распространения ЛП и задымленности территории, ошибки в тактике тушения, отсутствие расчета безопасных маршрутов выхода из зоны пожара [13]. Совместное решение задач маршрутизации и локализации лесных пожаров позволяет заранее определить условия безопасного выхода и своевременно принять меры по спасению. Для расчета безопасных маршрутов вывода сил и средств используется теория построения областей достижимости систем управления [6].

Разработка теоретических и практических аспектов решения рассмотренных задач является основой создания компьютерных учебных и исследовательских тренажеров для отработки действий персонала при различных сценариях развития лесных пожаров [10]. На основе разработанной теории создан и передан в ряд организаций Госкомитета по лесу РФ комплекс программ ТАЖГА-2, предназначенных для обучения оперативного персонала борьбе с лесными пожарами.

Комплекс программных средств для решения задач оперативного управления борьбой с ЛП включает следующие подсистемы: картографическую базу данных (БД), содержащую сведения о топографии, ЛГМ и инфраструктуре местности; БД по наземным и авиационным средствам доставки противопожарных сил и средств к месту пожара; БД по техническим средствам борьбы с пожарами; комплекс программ по расчету процессов распространения огня в различных лесорастительных и погодных условиях; комплекс программ по выбору тактики локализации ЛП.