

В. Ф. КОЛПАКОВ, канд. техн. наук, доцент, Московский государственный психолого-педагогический университет (Россия, 127051, г. Москва, ул. Сретенка, 29; e-mail: v.kolpakov53@mail.ru)

УДК 614.841.42

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Рассматривается один из подходов информационной поддержки при выработке управления в условиях чрезвычайных ситуаций. Показано, что рассматриваемый алгоритм управления может быть использован при ликвидации чрезвычайных ситуаций различного характера; здесь же в качестве объекта исследования были выбраны лесные пожары. При принятии управляющих решений использован аппарат нечеткого моделирования, основанный на экспертных оценках текущей ситуации. Основные характеристики состояния пожарной обстановки представлены измерениями площади пожара и скорости ее изменения, а результирующий управляющий сигнал формировался в виде заданной скорости создания заградительной полосы. Показано, что результаты исследования могут быть использованы для оценки пожарной обстановки и выдачи адекватных рекомендаций по привлечению сил и средств для реализации необходимых темпов локализации пожара.

Ключевые слова: лесные пожары; математическое моделирование; нечеткое моделирование; нечеткие множества; экспертные оценки; алгоритм управления.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.65-73

Введение

Серьезную опасность для окружающей среды, экономики и населения представляют пожары в условиях природы, так называемые ландшафтные пожары. По своей сути ландшафтный пожар — это стихийно распространяющееся горение, в результате которого уничтожаются леса, кустарники, запасы торфа и различные виды растительности, находящейся на его пути. Основными разновидностями ландшафтных пожаров в России являются лесные, торфяные и степные пожары. Чрезвычайную опасность представляют лесные пожары, которые, как правило, к моменту их обнаружения и началу борьбы с ними охватывают достаточно обширные территории и требуют значительных сил и средств для ликвидации. Известно, что основной и наиболее трудоемкой фазой тушения лесного пожара является его локализация. Один из основных методов локализации пожара — создание заградительных полос, обеспечивающих надежное препрятствие путей его распространения [1].

Современные исследования показывают, что ход и результаты работ по ликвидации лесных пожаров зависят не только от соотношения ресурсно-экономического, морального, научно-технического и организационного потенциала противопожарных служб, но и от эффективности работы системы оперативного управления тушением пожара.

Задачи оперативного управления при тушении пожаров характеризуются случайными моментами времени поступления заявок на их решение. Обычно объем поступающей для решения задач оперативного управления информации небольшой, а частота поступлений таких задач достаточно высока. Время же для принятия решения, как правило, невелико и является лимитирующим фактором. Частота изменений исходных данных высока, а их достоверность низка. Исходя из этого точность решения задач оперативного управления обычно определяется не только достоверностью данных, но и качеством алгоритмов решения задач данного класса.

В целях повышения эффективности оперативного управления ликвидацией пожаров в настоящей статье предлагается использовать методы математического моделирования и прогнозирования. Однако в настоящее время научные и практические аспекты использования методов математического моделирования и оптимального управления в сфере управления и мониторинга пожарной обстановки проработаны не в достаточной степени. В связи с этим вопросы, связанные с внедрением математических методов в информационную среду поддержки принятия решений в условиях значительной неопределенности, являются весьма актуальными.

Большинство классических методов оптимального управления динамическими системами связано

с решением задачи оптимизации функционала качества и базируются на использовании достоверных математических моделей объектов управления. Однако применительно к пожару как объекту управления использовать такие методы просто не представляется возможным, поскольку в силу значительной случайности факторов пожара таких моделей просто не существует. В [2] была предпринята попытка для этой цели использовать метод обратных задач динамики [3], где было показано, что из-за слабой адекватности модели могут возникать значительные ошибки управления. Для придания робастных свойств (робастности) системе управления была решена задача формирования управления, обеспечивающего движение системы не по эталонной траектории, а в ее окрестности. В этом случае необходима, хотя, может, и не совсем точная, модель динамики пожара, что является проблематичным.

Цель настоящей работы — разработка алгоритма формирования управляющего сигнала на основе экспертных оценок пожарной ситуации с использованием метода нечеткого моделирования. Информационными сигналами в данном случае являются измерения площади пожара и скорости его распространения. Как будет показано ниже, знание модели пожарной ситуации здесь не требуется. Следует отметить, что попытки использовать теорию нечеткого моделирования для решения задач такого рода уже предпринимались рядом авторов, в частности при мониторинге пожарной обстановки техногенного характера [4]. Рассмотрим основные положения метода.

Материалы и методы

В последнее время значительно возрос интерес к различным аспектам проблемы интеллектуального управления. Одним из основных направлений, связанных с этой проблемой, является использование аппарата нечеткого моделирования [5–9], основанного на теории нечетких множеств, нечеткой логики.

Использование систем управления, базирующихся на законах нечеткой логики, особенно актуально, когда данные об объекте управления скучны или вообще отсутствуют и невозможны традиционные методы его моделирования и управления. В условиях значительной неопределенности, к которым относятся лесные пожары, принятие решений зачастую осуществляется с помощью экспертных оценок. При этом лица, принимающие решения, не в полной мере могут формально представить себе этот процесс. И дело здесь не в том, что они плохо понимают то, что делают, а в том, что неопределенность лежит в самой природе принятия решения. В этих условиях при принятии решений высокая точность априори невозможна, да она не требуется и в большинстве жизненных ситуаций.

Здесь будут рассмотрены некоторые аспекты возможности нечеткого управления с использованием нечетких моделей объектов управления и управляемых систем.

Традиционная математика оперирует данными точного количественного характера: например, температура 36,6 °C, скорость 120 км/ч и т. д. Однако в жизни нам часто приходится сталкиваться с информацией нечеткого характера, например, с такой, как нормальная температура, высокая температура, низкая скорость, высокая скорость и т. д. До недавнего времени в рамках традиционной математики такую информацию использовать было невозможно. По этой причине эффективность многих методов моделирования и управления была ограничена, особенно в ситуациях, когда об объекте исследования не было ничего известно, кроме неточной информации.

Область математики, имеющая дело с неточной информацией, получила название теории нечетких множеств. Эта теория совместно с обычной математикой позволяет обрабатывать и использовать информацию любого вида.

Теория и расчеты

Основы управления с использованием нечеткой логики

Сущность теории нечетких множеств. Как уже было сказано выше, в ряде случаев ввиду отсутствия точной информации человек оперирует качественными оценками — “низкая”, “нормальная”, “высокая” и т. п. В случае анализа состояния температуры тела эти оценки можно изобразить графически (рис. 1).

Функции $\mu(t)$ — “низкая”, “нормальная” и “высокая” — называются функциями принадлежности.

В общем случае функция принадлежности $\mu(x)$: $X \rightarrow [0; 1]$, т. е. ставит в соответствие каждому элементу $x \in X$ число $\mu(x)$ из интервала $[0; 1]$, описывающее степень принадлежности элемента x качественному критерию (“низкая”, “нормальная” и т. д.).

Оценки такого рода еще называют информационными гранулами. Если трех гранул (для примера, используемого выше) недостаточно, то точность оценки можно увеличить включением большего количества гранул, например “очень низкая”, “очень высокая”.

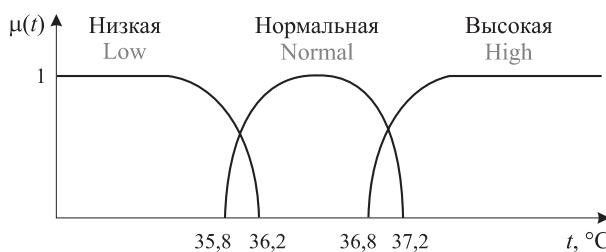


Рис. 1. Качественные оценки температуры
Fig. 1. Qualitative temperature estimates

Информация, представленная в виде гранул, имеющих ненулевую ширину, называется нечеткой информацией.

Основные понятия теории нечетких множеств. В окружающем мире имеется большое число величин, которые нельзя оценить с помощью измерительных устройств, так как таких просто не существует (например, шансы на успех в каком-либо мероприятии). Однако у каждого человека есть свое “измерительное” субъективное восприятие действительности, на основании которого, используя свои логические и интеллектуальные способности, он принимает решения. По этой причине ученых и инженеров возникла идея создания систем с искусственным интеллектом, подобным человеческому интеллекту.

Важнейшим условием решения этой проблемы является перевод нечетких качественных оценок на язык математики, что позволит значительно расширить традиционные методы математического моделирования.

Рассмотрим основные понятия, связанные с нечеткими множествами.

Нечетким называется множество A , удовлетворяющее выражению:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in X\}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что это множество пар: объектная переменная x и функция ее принадлежности $\mu_A(x)$ множеству A . При этом

$$\mu_A(x) \in [0; 1].$$

Функция принадлежности отображает числовую последовательность значений X данной переменной на отрезок $[0; 1]$:

$$\mu_A: X \rightarrow [0; 1].$$

Функция принадлежности каждому значению x ставит в соответствие некоторое число из интервала $[0; 1]$. Это число называется степенью принадлежности.

Одним из ключевых понятий нечеткой логики является понятие лингвистической переменной. Значения числовой переменной x интерпретируются в некую оценку на естественном языке, которая и является лингвистической переменной (“температура тела”, “температура окружающей среды”, “скорость автомобиля” и т. д.).

Значения лингвистической переменной выражаются также с помощью словесной формы (термы) и называются лингвистическими значениями (“низкая”, “высокая” и т. д.) (рис. 2). Таким образом, лингвистическая переменная — это переменная, значениями которой являются термы.

Лингвистическим терм-множеством называется множество всех лингвистических значений, используемых для определения некоторой лингвистической переменной. Для обозначения терм-множеств будем использовать запись вида (для примера на рис. 2):

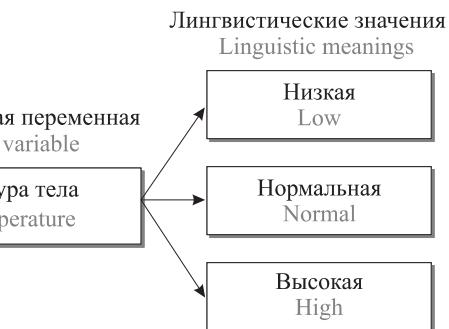


Рис. 2. Структура лингвистической переменной
Fig. 2. The structure of the linguistic variable

зываемых для определения некоторой лингвистической переменной. Для обозначения терм-множеств будем использовать запись вида (для примера на рис. 2):

$$TT = \{\text{НИТ, НОТ, ВТ}\},$$

где ТТ — терм-множество “температура тела”;

НИТ — “низкая температура”;

НОТ — “нормальная температура”;

ВТ — “высокая температура”.

Типы функций принадлежности. При малом объеме информации об объектах управления, к которым следует отнести и лесные пожары, естественным является выбор самых простых функций принадлежности — многоугольных, состоящих из прямолинейных отрезков, для нахождения параметров которых требуется наименьший объем информации по сравнению с другими функциями (рис. 3).

Основные операции над нечеткими множествами. Основными элементами нечетких моделей являются логические правила, например:

ЕСЛИ $[(x_1 \text{ большое}) \text{ И } (x_2 \text{ большое})]$

ИЛИ $[(x_1 \text{ среднее}) \text{ И } (x_2 \text{ большое})]$ ТО $(y \text{ большое}),$

где (x_1, x_2) — входные величины;

y — выходная величина;

“большое”, “среднее” — нечеткие множества;

ЕСЛИ — ТО, И, ИЛИ — логические связки.

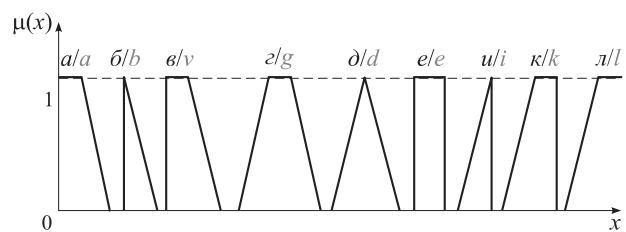


Рис. 3. Наиболее часто используемые многоугольные функции принадлежности: a, l — левая и правая крайние; b, i — асимметричные треугольные; v, k — асимметричные трапециевидные; g — симметричная трапециевидная; d — симметричная треугольная; e — прямоугольная

Fig. 3. The most frequently used polygonal membership functions: a, l — left and right extreme; b, i — asymmetric triangular; v, k — asymmetric trapezoidal; g — symmetric trapezoidal; d — symmetric triangular; e — rectangular

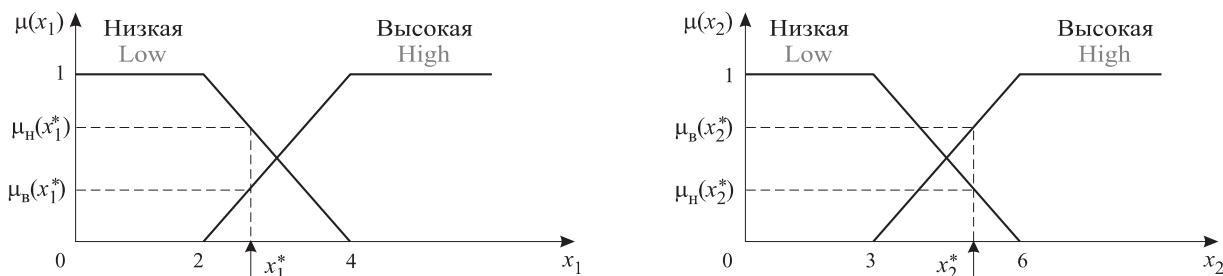


Рис. 4. Функции принадлежности входных сигналов
Fig. 4. Input functions of input signals

Для реализации таких нечетких алгоритмов используются операции логического характера. Пусть два нечетких множества A и B заданы своими функциями принадлежности $\mu_A(x)$ и $\mu_B(x)$. Тогда над этими множествами можно выполнять следующие операции:

- *объединение* (дизъюнкция) двух нечетких множеств, которое соответствует операции ИЛИ и соответствует наименьшему множеству, содержащему оба множества A и B . Функция принадлежности для объединенного множества определяется с использованием операции максимума:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X;$$

- *пересечение* (конъюнкция) двух нечетких множеств A и B , которое соответствует операции И

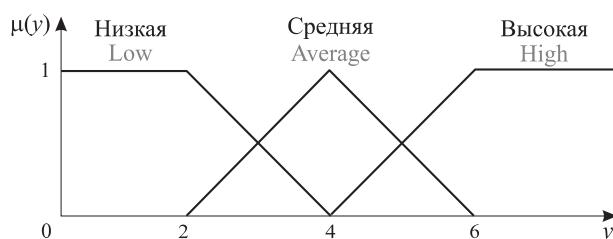


Рис. 5. Функция принадлежности выходного сигнала
Fig. 5. Function of the output signal

и определяется как наибольшее нечеткое множество, являющееся подмножеством обоих множеств. Функция принадлежности множества $A \cap B$ определяется с помощью операции MIN:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X.$$

Нечеткое моделирование. Рассмотрим принципы нечеткого моделирования на примере системы с двумя входами и одним выходом.

Пусть лингвистические переменные, связанные со значениями x_1 и x_2 , представлены лингвистическими значениями “низкая”, “высокая” и имеют функции принадлежности соответственно $\mu(x_1)$ и $\mu(x_2)$ (рис. 4). Функция принадлежности нечетких значений выхода $\mu(y)$ представлена на рис. 5.

Типовая структура нечеткой модели системы приведена на рис. 6.

На вход нечеткой модели поданы два четких числовых значения x_1^* , x_2^* . Блок *фаззификации* по функциям принадлежности вычисляет степень принадлежности этих входов нечетким множествам: $\mu_B(x_1^*)$, $\mu_H(x_1^*)$, $\mu_B(x_2^*)$, $\mu_H(x_2^*)$ (см. рис. 4). Здесь индексами “*Н*” и “*В*” обозначены нечеткие множества “низкая” и “высокая” соответственно.

Механизм вывода с использованием логической базы правил осуществляет преобразование входной

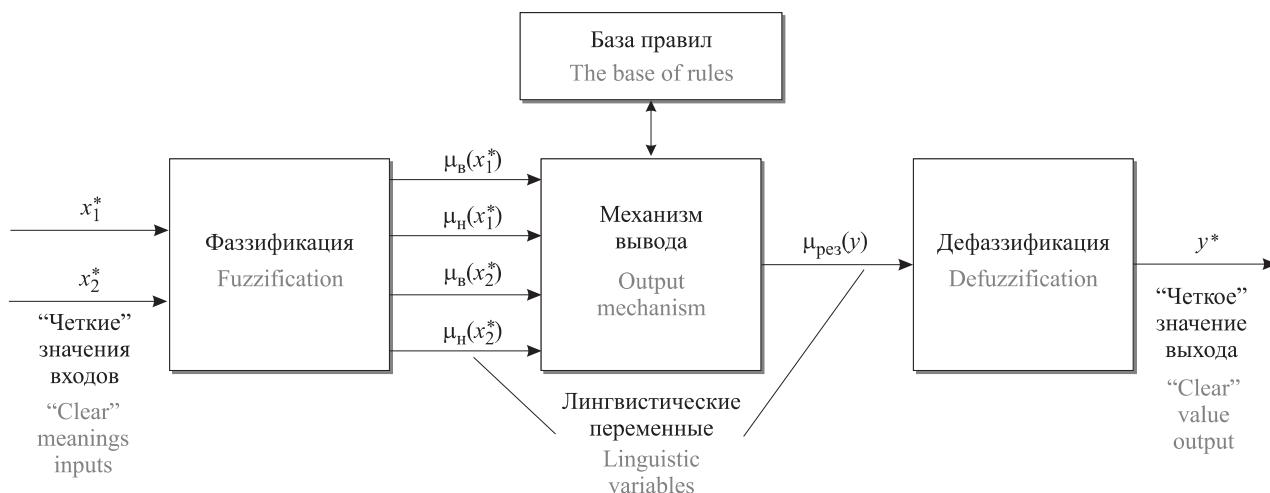


Рис. 6. Структура нечеткой модели
Fig. 6. The structure of the fuzzy model

информации ($\mu_{\text{в}}(x_1^*), \mu_{\text{н}}(x_1^*), \mu_{\text{в}}(x_2^*), \mu_{\text{н}}(x_2^*)$) в так называемую результирующую функцию принадлежности выходного значения модели $\mu_{\text{рез}}(y)$. Кроме базы правил, неотъемлемым элементом блока вывода является наличие функции принадлежности выхода $\mu(y)$ (см. рис. 5).

База правил состоит из логических правил, которые задают в системе причинно-следственные отношения между нечеткими значениями ее входных и выходных величин (см. рис. 4 и 5).

В соответствии со структурой, приведенной на рис. 6, последним этапом моделирования является операция *дефазификации*. Смысл этой операции заключается в следующем: на основе функции принадлежности $\mu_{\text{рез}}(y)$ с использованием некоторого метода осуществляется выбор “четкого” значения y^* , являющегося результатом для входных числовых значений x_1^*, x_2^* .

Существует несколько методов дефазификации. Остановимся на наиболее часто используемом *дискретном методе центра тяжести*, в котором выходное значение y^* вычисляется по формуле

$$y^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i \tilde{y}_i / \sum_{i=1}^n \alpha_i, \quad (2)$$

где n — количество правил;

α_i — веса, учитывающие уровень выполнения условия ЕСЛИ i -го правила, называемые также уровнями активности соответствующих правил; \tilde{y}_i — центральные значения нечетких подмножеств ($\mu_{\text{н}}(y), \mu_{\text{c}}(y), \mu_{\text{в}}(y)$) выходной переменной y .

Синтез нечеткого регулятора тушением лесного пожара

Будем предполагать, что в качестве входной информации для формирования алгоритма управления тушением пожара будет использоваться площадь пожара $S(t)$ и скорость его распространения $\dot{S}(t)$. Результирующее управляющее решение будет сформировано в виде заданных темпов создания заградительной полосы $\dot{u}(t)$. Задача нечеткого регулятора будет заключаться в формировании функциональной зависимости

$$\dot{u}(t) = f(S(t), \dot{S}(t)). \quad (3)$$

Для приведения нечетких множеств к нормальному виду необходимо перейти к относительным единицам измерения:

$$\bar{S}(t) = \frac{S(t)}{S_{\max}}; \quad \bar{\dot{S}}(t) = \frac{\dot{S}(t)}{\dot{S}_{\max}}; \quad \bar{u}(t) = \frac{\dot{u}(t)}{\dot{u}_{\max}},$$

где S_{\max} — максимально возможная (прогнозная) площадь выгоревшего лесного массива; \dot{S}_{\max} — максимальная прогнозируемая скорость увеличения площади пожара;

\dot{u}_{\max} — максимально возможные темпы создания заградительной полосы.

Значения $S_{\max}, \dot{S}_{\max}, \dot{u}_{\max}$ выбираются экспертами, входящими в штаб по организации тушения пожара. Оценка этих значений осуществляется исходя из вида пожара (низовой, верховой, почвенный), его силы и масштаба, характеристик местности и лесной площади, метеорологических условий, наличия сил и средств для тушения пожара. Для задания примерных значений S_{\max}, \dot{S}_{\max} можно использовать простой алгоритм, основываясь на первых измерениях (на момент выявления пожара) S_0, \dot{S}_0 и на предполагаемом времени тушения пожара.

Выбор \dot{u}_{\max} должен быть согласован с максимально возможной скоростью изменения периметра пожара $\dot{l}(t)$. Известно, что при скорости ветра не более 5 м/с и однородном горючем материале пожар принимает грушевидную форму. Тогда, если заменить его одинаковым по площади квадратом, длина периметра пожара

$$l = 4\sqrt{S}.$$

Однако с учетом извилистости кромки пожара следует принимать

$$l = 5\sqrt{S}.$$

Тогда максимальная скорость его изменения может быть рассчитана по формуле

$$\dot{l}_{\max} = 5\dot{S}_{\max} / (2\sqrt{S_{\max}}).$$

Для успешной локализации пожара скорость создания заградительной полосы должна быть выше скорости изменения периметра пожара, по крайней мере, в два раза, т. е.

$$\dot{u}_{\max} = 2\dot{l}_{\max}.$$

Нечеткий регулятор (НР) функционально представлен структурой (см. рис. 6), включающей в себя базу знаний (базу правил) и механизм логического вывода. Для данной задачи $x_1^* = \bar{S}(t); x_2^* = \bar{\dot{S}}(t); y^* = \bar{u}(t)$. Результирующим выходом НР являются “четкие” значения управления $\bar{u}(t) = f(\bar{S}(t), \bar{\dot{S}}(t))$, формируемые в блоке дефазификации.

Для упрощения реализации алгоритма управления время t представим дискретными моментами времени t_i ($i = 0, 1, 2, \dots$), в результате чего будем оперировать дискретными входами $\bar{S}_i, \bar{\dot{S}}_i$ и дискретным выходным сигналом \bar{u}_i .

Базу правил алгоритма управления удобнее всего представить в виде таблицы решений (табл. 1), которая для данной задачи формируется экспертами. Лингвистические значения, используемые в табл. 1, имеют следующий смысл: О — “около нуля”; М — “малое”; С — “среднее”; Б — “большое”.

Таблица 1. База правил алгоритма управления
Table 1. The basis of the rules of the control algorithm

	О	О	О	М	С
М	О	М	С	С	
С	О	С	С	Б	
Б	О	С	Б	Б	
	О	М	С	Б	
		\bar{S}_i			

Таблица заполняется следующим образом. На пересечении j -й строки и k -го столбца записывается требуемое значение управления \bar{u}_i , соответствующее j -му значению \bar{S}_i и k -му значению \bar{S}_i .

Поясним логическую интерпретацию параметров этой таблицы. Пусть, например, площадь пожара \bar{S}_i невелика и принадлежит к нечеткому множеству О, а скорость изменения площади пожара $\dot{\bar{S}}_i$ — к нечеткому множеству Б. В этом случае управление должно соответствовать множеству С.

Тогда правила формирования сигнала управления можно записать в следующем виде:

П1: ЕСЛИ $\{[(\bar{S}_i = \text{O}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{O})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{M}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{O})]$ ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{C}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{O})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{Б}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{O})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{O}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{M})]\}$ ТО $\bar{u}_i = \text{O};$

П2: ЕСЛИ $\{[(\bar{S}_i = \text{O}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{C})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{M}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{M})]\}$ ТО $\bar{u}_i = \text{M};$

П3: ЕСЛИ $\{[(\bar{S}_i = \text{O}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{Б})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{M}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{C})]$ ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{M}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{Б})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{C}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{M})]$ ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{C}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{C})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{Б}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{M})]\}$ ТО $\bar{u}_i = \text{C};$

П4: ЕСЛИ $\{[(\bar{S}_i = \text{C}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{Б})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{Б}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{C})]$
 ИЛИ $[(\bar{S}_i = \text{Б}) \text{ И } (\dot{\bar{S}}_i = \text{Б})]\}$ ТО $\bar{u}_i = \text{Б}.$

Пусть функции принадлежности имеют форму, представленную на рис. 7. Для моделирования функций принадлежности введем параметры: $c_1 = 0,25$; $c_2 = 0,5$; $c_3 = 0,75$; $c_4 = 1$; $a = 0,25$.

Рассмотрим на примере функции принадлежности для сигнала \bar{S} :

$$\mu_O = \begin{cases} \omega_O, & \text{если } \bar{S} \leq c_1; \\ \omega_O \left(\frac{-c_2 + \bar{S}}{c_1 - c_2} \right) & \text{в других случаях}; \end{cases}$$

$$\mu_M = \omega_M \left(\frac{a - |\bar{S} - c_2|}{a} \right); \quad \mu_C = \omega_C \left(\frac{a - |\bar{S} - c_3|}{a} \right);$$

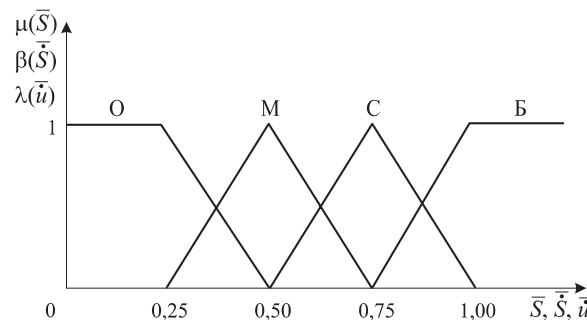


Рис. 7. Функции принадлежности входных и выходного сигналов

Fig. 7. Input and output accessories

$$\mu_B = \begin{cases} \omega_B, & \text{если } \bar{S} \geq c_4; \\ \omega_B \left(\frac{-c_3 + \bar{S}}{c_4 - c_3} \right) & \text{в других случаях}, \end{cases}$$

где логические переменные $\omega = 1$, если \bar{S} попадает в область определения соответствующей функции, отличающейся от нуля, и $\omega = 0$ — в других случаях. Так, например,

$$\omega_M = \begin{cases} 1, & \text{если } c_2 - a \leq \bar{S} \leq c_2 + a; \\ 0 & \text{в других случаях}. \end{cases}$$

Аналогичным образом описываются функции принадлежности $\beta(\dot{S})$.

Используя метод максимума-минимума, осуществим фазификацию и определим уровни активности правил λ :

$$\lambda_O = \max(\min(\mu_O, \beta_O), \min(\mu_M, \beta_O), \min(\mu_C, \beta_O), \min(\mu_B, \beta_O), \min(\mu_O, \beta_M));$$

$$\lambda_M = \max(\min(\mu_O, \beta_C), \min(\mu_M, \beta_M));$$

$$\lambda_C = \max(\min(\mu_O, \beta_B), \min(\mu_M, \beta_C), \min(\mu_M, \beta_B), \min(\mu_C, \beta_M), \min(\mu_C, \beta_C), \min(\mu_B, \beta_M));$$

$$\lambda_B = \max(\min(\mu_C, \beta_B), \min(\mu_B, \beta_C), \min(\mu_B, \beta_B)).$$

Осуществим дефазификацию с помощью дискретного метода центра тяжести по формуле

$$\bar{u} = \frac{\lambda_O u_O + \lambda_M u_M + \lambda_C u_C + \lambda_B u_B}{\lambda_O + \lambda_M + \lambda_C + \lambda_B},$$

где u_O, u_M, u_C, u_B — представление функции принадлежности для управления в виде точечных подмножеств. В нашей задаче эти параметры принимали следующие значения (см. рис. 7): $u_O = 0,25$; $u_M = 0,5$; $u_C = 0,75$; $u_B = 1$.

В [1, 10] были рассмотрены и обоснованы математические модели лесных пожаров. Для численного моделирования динамики тушения лесного пожара и измерения его координат $S(t)$, $\dot{S}(t)$ была использована модель вида [1]:

$$\dot{S}(t) = \alpha \sqrt{S(t)} - k \cdot u(t), \quad (4)$$

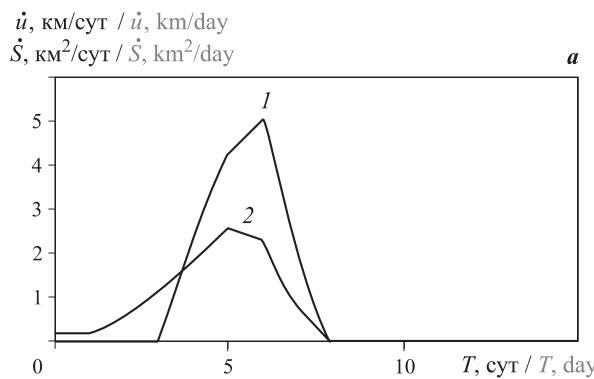
где α — интенсивность распространения пожара;
 $S(t)$ — площадь возгорания;
 k — коэффициент усиления при управлении;
 $u(t)$ — управляющий сигнал (длина заградительной полосы).

Связь управления, формируемого нечетким регулятором (\bar{u}), с управляющим сигналом $u(t)$ в (4) осуществляется с помощью интеграла

$$u(t) = \dot{u}_{\max} \int_0^t \bar{u}(\tau) d\tau.$$

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования управления тушением пожара с использованием алгоритма нечеткой логики представлены на рис. 8. Программирование задачи было выполнено с помощью пакета Mathcad [11].



В эксперименте были использованы следующие масштабные параметры: $S_{\max} = 10$ км²; $\dot{S}_{\max} = 3$ км²/сут; $\dot{u}_{\max} = 7$ км/сут.

Из рис. 8 следует, что при таких предполагаемых характеристиках пожара и возможном максимальном темпе создания заградительной полосы, равном 7 км/сут, пожар будет локализован за 6 сут, а выгоревшая площадь составит 9 км².

Если же для данных экспертных оценок возможной интенсивности пожара и времени его тушения не будут обеспечены рекомендуемые темпы возведения заградительной полосы и i_{\max} реализовать будет невозможно, то, естественно, эффективность тушения пожара снижается.

На рис. 9 представлены результаты ликвидации пожара при $i_{\max} = 5$ км/сут. Из рис. 9 следует, что в этом случае площадь выгоревшего леса превысит 10 км², а время его тушения составит 8–9 сут.

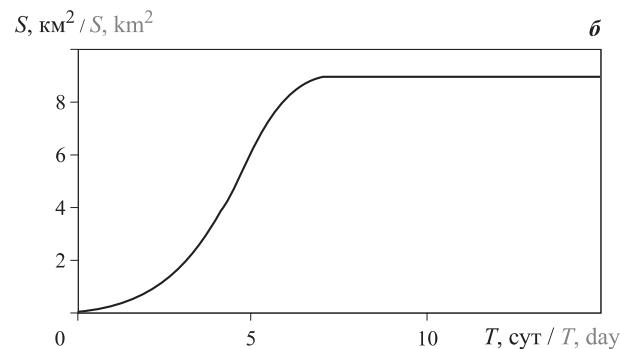


Рис. 8. Динамические характеристики тушения пожара с использованием алгоритма нечеткой логики при $i_{\max} = 7$ км/сут: *а* — динамические характеристики пожара (1 — темп создания заградительной полосы (управление) $\dot{u}(t)$, км/сут; 2 — темп изменения площади пожара $\dot{S}(t)$, км²/сут); *б* — изменение площади пожара

Fig. 8. Dynamic characteristics of fire extinguishing using the fuzzy logic algorithm, with $i_{\max} = 7$ km/day: *a* — dynamic characteristics of a fire (1 — rate of the creation of the barrage band (control) $\dot{u}(t)$, km/day; 2 — rate of change of fire area $\dot{S}(t)$, km²/day); *b* — change of fire area

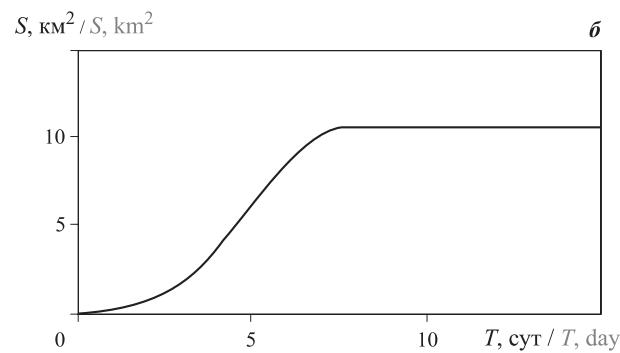
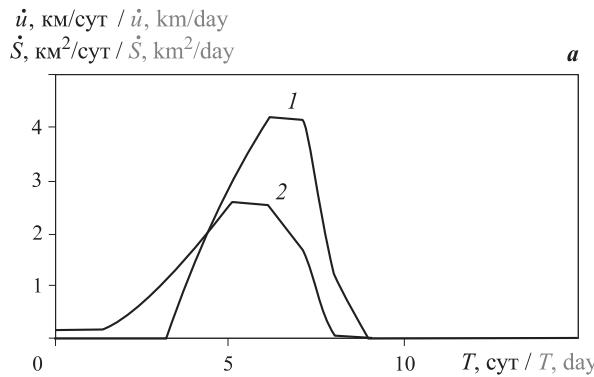


Рис. 9. Динамические характеристики тушения пожара с использованием алгоритма нечеткой логики при $i_{\max} = 5$ км/сут: *а* — динамические характеристики пожара (1 — темп создания заградительной полосы (управление) $\dot{u}(t)$, км/сут; 2 — темп изменения площади пожара $\dot{S}(t)$, км²/сут); *б* — изменение площади пожара

Fig. 9. Dynamic characteristics of fire extinguishing using the fuzzy logic algorithm with $i_{\max} = 5$ km/day: *a* — dynamic characteristics of a fire (1 — rate of the creation of the barrage band (control) $\dot{u}(t)$, km/day; 2 — rate of change of fire area $\dot{S}(t)$, km²/day); *b* — change of fire area

Заключение

Результаты численного эксперимента показали, что алгоритм управления тушением пожара с использованием аппарата нечеткого моделирования приводит к достаточно неплохим результатам. Нечеткое моделирование как инструмент может использоваться при анализе пожарной обстановки и выработке управляющих решений по ликвидации пожара. Эффективность применения результатов

нечеткого моделирования в значительной мере определяется компетентностью экспертов в выборе априорных характеристик пожара и точностью измерения площади пожара и скорости его распространения. При этом в программе, реализующей алгоритм нечеткого регулятора, используются текущие измерения параметров пожара, и в этом смысле она является вполне адаптивной к изменению состояния пожарной обстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпаков В. Ф. Один из подходов моделирования лесных пожаров с целью повышения эффективности их ликвидации // Безопасность жизнедеятельности. — 2011. — № 4. — С. 43–47.
2. Колпаков В. Ф. Синтез адаптивного алгоритма управления ликвидацией лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 11. — С. 17–23.
3. Крутъко П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций : учебное пособие для вузов. — М. : Машиностроение, 2004. — 573 с.
4. Тетерин И. М., Топольский Н. Г., Прус Ю. В., Климовцов В. М. Системы поддержки принятия управлеченческих решений при тушении пожаров : монография / Под общ. ред. Н. Г. Топольского. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. — 102 с.
5. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика : учебное пособие. — М. : Радиотехника, 2009. — 392 с.
6. Пегат A. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. — 2-е изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 798 с.
7. Zadeh L. A. Fuzzy logic and the calculi of fuzzy rules and fuzzy graphs // Multiple-Valued Logic. — 1996. — Vol. 1. — P. 1–38.
8. Zadeh L. A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic // Fuzzy Sets and Systems. — 1997. — Vol. 90, Issue 2. — P. 111–127. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00077-8.
9. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems // Fuzzy Sets and Systems. — 1992. — Vol. 45, Issue 2. — P. 135–156. DOI: 10.1016/0165-0114(92)90113-i.
10. Колпаков В. Ф. Параметрическая идентификация модели лесных пожаров // Безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 5. — С. 39–44.
11. Охорзин В. А. Прикладная математика в системе MATHCAD : учебное пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб. : Изд-во “Лань”, 2008. — 348 с.

Материал поступил в редакцию 18 мая 2017 г.

Для цитирования: Колпаков В. Ф. Применение нечеткого моделирования для информационной поддержки принятия решений при ликвидации лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 7. — С. 65–73. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.65-73.

English

APPLICATION OF FUZZY MODELING FOR INFORMATION SUPPORT OF DECISION-MAKING IN EXTINGUISHING FOREST FIRES

KOLPAKOV V. F., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Moscow State Psychological and Pedagogical University (Sretenka St., 29,
Moscow, 127051, Russian Federation; e-mail: v.kolpakov53@mail.ru)

ABSTRACT

Forest fires are uncontrolled burning of vegetation in forest territory. Its danger lies in its rapid and spontaneous spread, which is difficult to combat, and the consequences are long-term restoration of

flora and fauna in the territory where it happened, damage to the ecological, economic, material condition of the territory of the region, physical and psychological health of people. At the same time, the prevention and elimination of forest fires is very expensive. At the same time, an important task is to quickly and effectively eliminate the fire, planned so that the costs were minimal. Depending on the type of forest fire, it is important to make timely decisions on the liquidation of such natural disasters. Such solutions require considerable time, analysis of a large amount of information and can not always be called optimal.

Thus, it is urgent to create methods and tools to improve the quality of firefighting forces and facilities. At the same time, the efficiency of operational control under conditions of considerable uncertainty depends not only on the reliability of the information, but also on its qualitative analysis, and in conditions of limited time. The article deals with the mathematical support for more effective decision-making in the elimination of forest fires. As a tool of fuzzy modeling was selected based on the theory of fuzzy sets, fuzzy logic. The substantiation of this approach is presented. Briefly outlines the main provisions of the method of fuzzy modeling. As a control function were chosen pace of barrage bands at different stages of fire fighting. This control is formed as a function of measurement known area of fire and its propagation velocity. The efficiency and effectiveness of the algorithm of forming control function were confirmed by numerical simulations. In modeling, to simulate a real situation, the fire pattern in the form of non-linear differential equations, developed by the author of this article was used.

Keywords: forest fires; mathematical modeling; fuzzy modeling; fuzzy sets; expert assessments; control algorithm.

REFERENCES

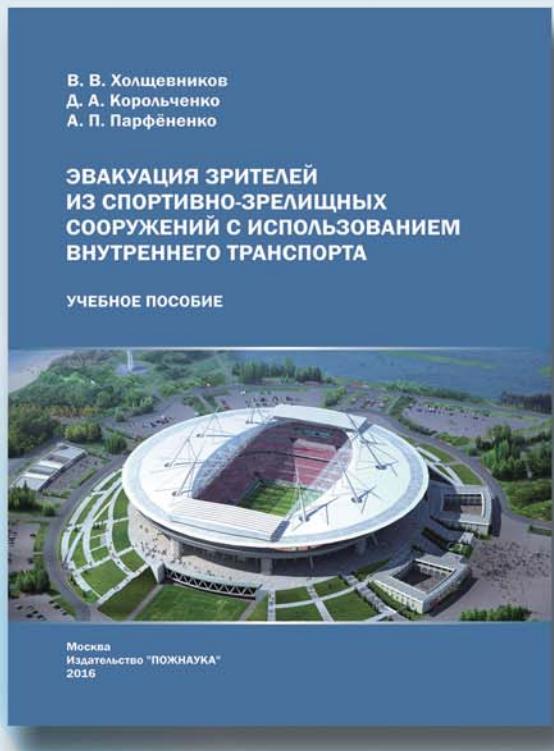
1. Kolpakov V. F. One approach modeling of forest fires in order to enhance their elimination. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti / Life Safety*, 2011, no. 4, pp. 43–47 (in Russian).
2. Kolpakov V. F. Synthesis of the adaptive control algorithm liquidation of forest fires. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*, 2013, p. 22, no. 11, pp. 17–23 (in Russian).
3. Krutko P. D. *Obratnyye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravleniya. Tsikl lektsiy* [The inverse dynamics problem in control theory. Lecture series]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2004. 573 p. (in Russian).
4. Teterin I. M., Topolskiy N. G. (ed.), Prus Yu. V., Klimovtsov V.M. *Sistemy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy pri tushenii pozharov. Monografija* [Systems to support the adoption of management decisions in extinguishing fires. Monograph]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2009. 102 p. (in Russian).
5. Vasilyev V. I., Ilyasov B. G. *Intellektualnyye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika* [Intelligent control systems. Theory and practice]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 392 p. (in Russian).
6. Andrzej Piecat. Fuzzy modeling and control. Heidelberg, New York, Physica-Verlag, 2001. 728 p. (Russ. ed.: Piecat A. Nechetkoye modelirovaniye i upravleniye. Moscow, BINOM. Laboratoriya znanij Publ., 2009. 798 p.).
7. Zadeh L. A. Fuzzy logic and the calculi of fuzzy rules and fuzzy graphs. *Multiple-Valued Logic*, 1996, vol. 1, pp. 1–38.
8. Zadeh L. A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, vol. 90, issue 2, pp. 111–127. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00077-8.
9. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*. 1992, vol. 45, issue 2, pp. 135–156. DOI: 10.1016/0165-0114(92)90113-i.
10. Kolpakov V. F. Parametric identification of models of forest fires. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti / Life Safety*, 2012, no. 5, pp. 39–44 (in Russian).
11. Okhorzin V. A. *Prikladnaya matematika v sisteme MATHCAD. 2-e izd.* [Applied mathematics for the MATHCAD. 2nd ed.]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2008. 348 p. (in Russian).

For citation: Kolpakov V. F. Application of fuzzy modeling for information support of decision-making in extinguishing forest fires. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 65–73 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.65-73.



ООО «Издательство «ПОЖНАУКА»

предлагает Вашему вниманию



Учебное пособие

Холщевников В. В., Корольченко Д. А., Парфёновенко А. П.

ЭВАКУАЦИЯ ЗРИТЕЛЕЙ ИЗ СПОРТИВНО-ЗРЕЛИЩНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТА

М. : Изд-во «ПОЖНАУКА», 2016. — 88 с.

Впервые в практике архитектурно-строительного преподавания рассмотрена методология учета важнейшего функционального процесса — движения людских потоков с использованием эскалаторов и лифтовых установок при различных режимах эксплуатации зданий, включая чрезвычайную ситуацию пожара, на примере реального объекта с большим количеством находящихся в нем людей.

121352, г. Москва, а/я 43
тел. (495)228-09-03
e-mail: mail@firepress.ru