УДК 614.842.83.07

А.Н. Денисов
(Академия ГПС МЧС России, dan_aleks@mail.ru)

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ПРИ ВВЕДЕНИИ ОГНЕТУШАЩИХ СРЕДСТВ

Формализованы модели управления силами и средствами пожарно-спасательных подразделений при тушении пожара мобильными средствами. Формализация осуществлена на основе обыкновенных дифференциальных уравнений. Ключевыми элементами моделей выбраны площади пожара и тушения. Предложена графическая интерпретация эффективности управленческого решения руководителя тушения пожара на подачу огнетушащих средств пожарно-спасательным подразделением.

Ключевые слова: пожаротушение, управление, модель.

A.N. Denisov

BASICS OF MATHEMATICAL MODELING OF FIRE AND RESCUE UNITS MANAGEMENT AT INTRODUCTION OF FIRE EXTINGUISHING MEANS

The models of control of the forces and means of fire and rescue units in extinguishing the fire by mobile means were formalized. Formalization is carried out on the basis of ordinary differential equations. The key elements of the models are selected the areas of fire and extinguishing. A graphical interpretation of the effectiveness of the managerial decision of the fire extinguishing director for the supply of fire extinguishing means by the fire and rescue unit is proposed.

Key words: fire fighting, control, model.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 8 августа 2017 г.

Пожарная тактика всё ещё остаётся такой наукой, в которой больше принято полагаться на мнение практика, чем на прогноз учёного. В пожаротушении теория, к сожалению, не играет лидирующей роли и всё же в последние годы в области управления пожарно-спасательными подразделениями при ведении оперативно-тактических действий при пожаре наблюдается увеличение теоретических исследований.

Математическое описание управленческого воздействия ***руководителя тушения пожара (РТП)*** на личный состав подразделения (позиции, участка и/или сектора тушения) разделяется на две группы – для практических целей (имитационные) и теоретические. Имитационные модели ценны вследствие анализа частных случаев управления пожарно-спасательными подразделениями при ведении оперативно-тактических действий при пожаре на конкретном объекте и примыкающей к нему территории. Для их изучения, как правило, используют аналитические методы. Теоретические описания пока ещё не вылились в стройную теорию, и эта статья вносит свой вклад в развитие теории.

Выбор ключевых параметров (переменных) для анализа такой сложной социальной, технической и технологической системы обеспечения пожарной безопасности мобильными средствами пожаротушения носит глобальный характер [1-4].

Для данной статьи выберем в качестве ключевых элементов моделей площади пожара и тушения.

Рассмотрим математические модели развития площади пожара при воздействии на неё огнетушащими веществами при разработке которых были приняты некоторые допущения:

1. Плотность горючей нагрузки может быть полностью описана с помощью одной переменной (пренебрегается неравномерное распределение горючей нагрузки).

2. Тушение происходит "мгновенно". Воздействие огнетушащих веществ на горящую поверхность:

$$Q_{ф} \geq Q_{тр}; \qquad I_{ф} \geq I_{тр},$$

где $Q_{тр}$, $Q_{ф}$ – требуемый и фактический расход огнетушащих веществ (*л*/*с*);

$I_{тр}$, $I_{ф}$ – требуемая и фактическая интенсивность огнетушащих веществ.

Это означает, что пренебрегаются протекающие переходные процессы после попадания ***огнетушащих веществ (ОВ)*** на горящую поверхность; личный состав всегда знает где находится огонь, и его поиском (например, в пустотах) не занимается.

Формализуем управление силами и средствами пожарно-спасательных подразделений при тушении пожара с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений.

Простейшее дифференциальное уравнение (уравнение экспоненциального роста [5]), описывающее скорость роста площади пожара до подачи огнетушащих веществ (рис. 1, время ввода первых пожарных стволов), имеет вид:

$$\frac{\mathrm{d}S_{п}}{\mathrm{d}t} = k \cdot S_{п}, \qquad (1)$$

где $S_{п}$ – площадь пожара (*м*^{2}) в момент времени, t;

k – коэффициент, характеризующий темп роста площади пожара (линейная скорость роста площади пожара, *м*^{2}/*мин*.).

Решением этого уравнения является функция

$$S_{п}(t) = S_0 \, \mathrm{e}^{kt},$$

где S_0 – площадь пожара в момент его обнаружения.

Эта функция описывает изменение площади при "стандартном" пожаре (рис. 1) [2, 4].

Из уравнения (1) следует, что если в любой момент времени начать наблюдение за распространением горения и продолжать его в течение короткого периода Δt, то часть площади, пройденной огнём в течение этого периода, будет равна $k \cdot \Delta t$, где k – постоянная. Уравнение (1) справедливо для ограниченного периода развития горения, так как в конечном счёте пожар прекратит распространяться.

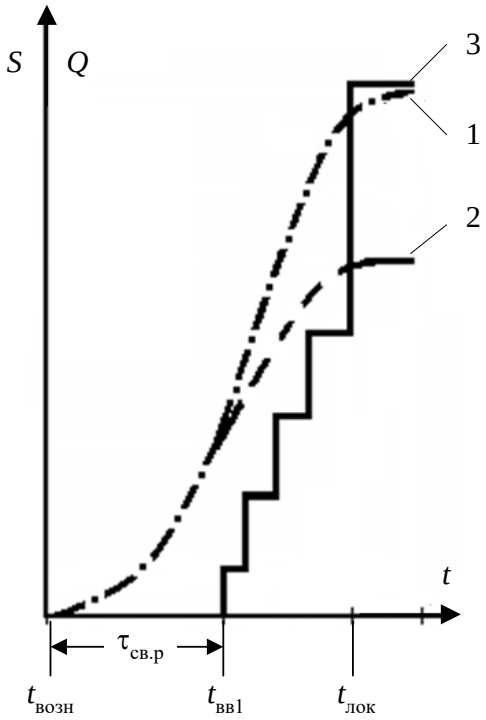

Рис. 1. Совмещённый график изменений требуемого и фактического расходов огнетушащих веществ, площадей пожара и его тушения:
1 – изменение площади пожара во времени $S_п = f(t)$;
2 – изменение площади тушения или требуемого на тушение расхода ОВ во времени $S_т(Q_{тр}) = f(t)$ (пунктирная линия – при круговой форме развития пожара);
3 – изменение фактического расхода во времени $Q_ф = f(t)$;
$t_{возн}$ – время возникновения пожара; $\tau_{св.р}$ – время свободного развития пожара;
$t_{вв1}$ – время ввода первых пожарных стволов; $t_{лок}$ – время локализации пожара

Горение может иногда стабилизироваться на некотором устойчивом значении, а также испытывать регулярные или нерегулярные колебания, или может уменьшаться в зависимости от горючей нагрузки, газообмена и других факторов.

Изменение площади пожара, стабилизируемой на некотором устойчивом уровне (рис. 1, $t_{лок}$), опишем с использованием логистического уравнения (П. Ферхюльста) (рис. 2):

$$\frac{dS_п}{dt} = k \cdot S_п - b \cdot S_п^2, \qquad (2)$$

где b – коэффициент, характеризующий горючую нагрузку.

Таким образом, второй член уравнения ($b\ S_п^2$) ограничивает возможность горения и называется "демпфирующим".

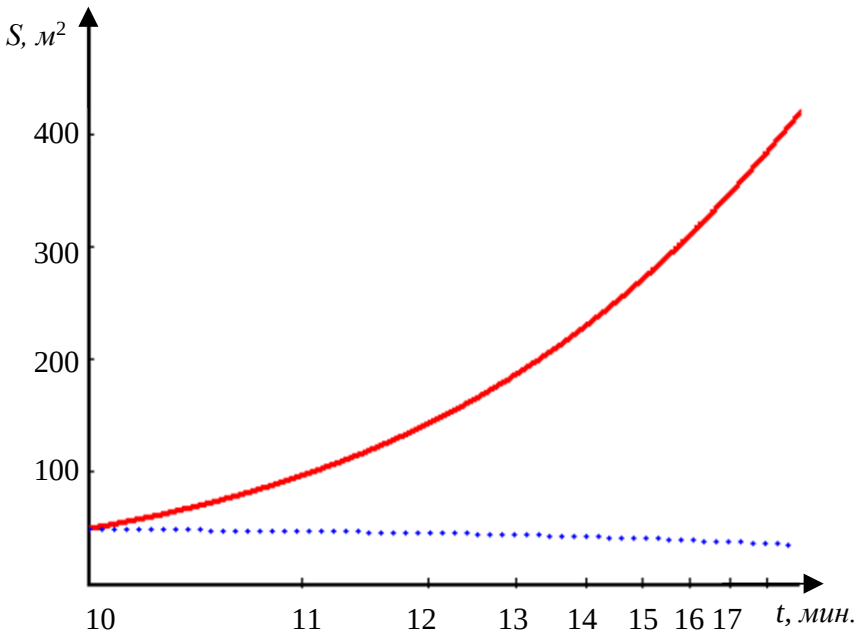

Рис. 2. Изменение площади пожара:
—— – площадь пожара;
++++++ – скорость роста площади пожара

Видоизменим уравнения Вольтерра в уравнения, описывающие тушение пожара пожарно-спасательным подразделением (взаимодействие огнетушащего вещества ($Q_ф \geq Q_{тр}$ и $I_ф \geq I_{тр}$) $S_т$ с горящей поверхностью $S_п$) (рис. 3):

$$\begin{cases} \dfrac{dS_п}{dt} = k \cdot S_п - b \cdot S_п^2 - c \cdot S_п \cdot S_т; \\ \dfrac{dS_т}{dt} = v \cdot S_т + e \cdot S_п \cdot S_т, \end{cases} , \qquad (3)$$

где v – скорость роста площади тушения пожара;

c, e – коэффициенты пропорциональности, характеризующие влияние подачи огнетушащих веществ на площадь пожара и тушения, соответственно.

В основе уравнений (3) лежит ещё одно допущение: при отсутствии подачи огнетушащих веществ, рост площади пожара будет происходить в соответствии с уравнением (2) с линейной скоростью распространения пламени k и по доступной для горения площади k/b. Так же в (3), а именно в уравнение для развития пожара, включён демпфирующий член ($– b\ S_п^2$), при этом уравнение, описывающее воздействие на горение огнетушащих веществ, такого члена не содержит, так как предполагается, что количество подаваемых огнетушащих веществ будет соответствовать нормативному.

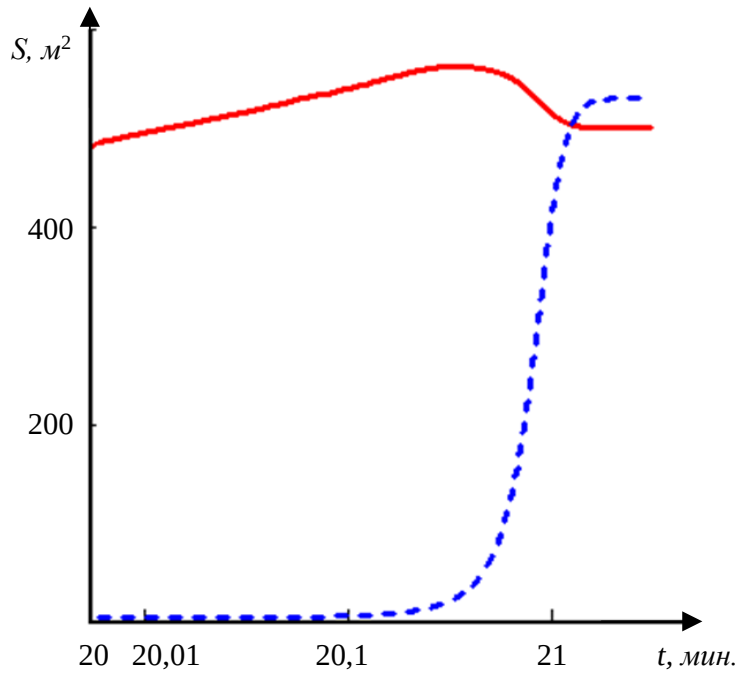

Рис. 3. Изменение площади пожара:
— – площадь пожара на момент ввода пожарных стволов;
--- – площадь тушения

С целью исследования непосредственной реализации управленческого воздействия РТП, завершающим этапом которого является подача огнетушащих веществ в очаг пожара, модифицируем уравнение (3) с учётом исследований [5]:

$$\begin{cases} \frac{dS_п}{dt} = f_1(S_п) - f_2(S_п, S_т); \\ \frac{dS_т}{dt} = v \cdot S_т + ep \cdot f_2(S_п, S_т), \end{cases} \quad (4)$$

где $f_1(S_п)$ – скорость изменения площади пожара, огнетушащие вещества не подаются;

$f_2(S_п, S_т)$ – интенсивность пожаротушения;

ep – эффективность пожаротушения.

С учётом допущений, изложенных в начале статьи, и с учётом того, что тактические возможности пожарно-спасательного подразделения соответствуют рангу пожара и скорость тушения соответствует плотности горючей нагрузки, уравнение (4) возможно упростить:

$$\begin{cases} \frac{dS_п}{dt} = f_1(S_п) - S_т \cdot f_2(S_п); \\ \frac{dS_т}{dt} = v \cdot S_т + ep \cdot S_т \cdot f_2(S_п), \end{cases} \quad (5)$$

Выводы, которые можно сделать, анализируя эти уравнения, сводятся к следующему:

- реализация управленческого решения РТП на подачу огнетушащих средств пожарно-спасательным подразделением при недостаточном объёме огнетушащих веществ, может привести к изменениям площади пожара (регулярным колебаниям системы);

- если площадь пожара ограничится пространством и горючей нагрузкой, а не огнетушащими средствами, то это приведёт к прекращению пожара (к затуханию колебаний системы);

- управленческое решение будет эффективно в том случае, если интенсивность пожаротушения соответствует кривой 1 (рис. 4).

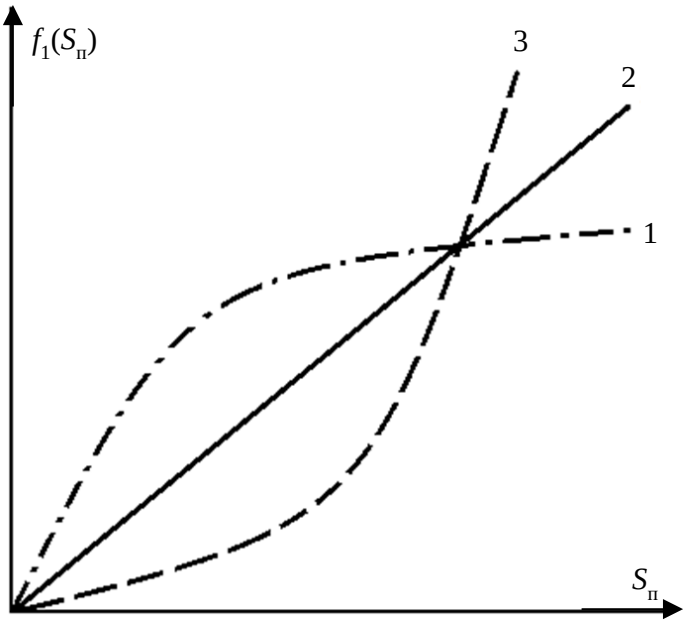

Рис. 4. Виды реализации управленческого решения РТП
на подачу огнетушащих средств пожарно–спасательным подразделением:
1 – эффективное; 2 – в соответствии с (3); 3 – неэффективное

Литература

1. Пожарная безопасность: учебник / Пучков В.А., Дагиров Ш.Ш., Агафонов А.В. и др. М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. 877 с.

2. Верзилин М.М., Повзик Я.С. Пожарная тактика. М.: Спецтехника НПО, 2007. 442 с.

3. Наумушкина К.А., Матвеев А.В., Таранцев А.А. Результаты моделирования распространения опасных факторов пожара в двухэтажных пассажирских вагонах // Матер. I междунар. науч.-практ. конф. "Высокие интеллектуальные технологии в науке и образовании". СПб.: "Стратегия будущего", 2017. Т. 1. С. 80-84.

4. Денисов А.Н., Усманов Р.А. Методы оперативного реагирования пожарно-спасательных подразделений для зданий повышенной этажности // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (68). С. 89-94. 2016. http://academygps.ru/ttb.

5. Ризниченко Г.Ю. Популяционная динамика. http://www.library.biophys.msu.ru.

References

1. Pozharnaja bezopasnost': uchebnik (Fire safety: textbook) / Puchkov V.A., Dagirov Sh.Sh., Agafonov A.V. i dr. M.: Akademija GPS MChS Rossii, 2014. 877 p.

2. Verzilin M.M., Povzik Ja.S. Pozharnaja taktika (Firefighting tactics). M.: Spectehnika NPO, 2007. 442 p.

3. Naumushkina K.A., Matveev A.V., Tarancev A.A. Rezul'taty modelirovanija rasprostranenija opasnyh faktorov pozhara v dvuhjetazhnyh passazhirskih vagonah (The results of modeling the spreading of dangerous fire factors in a two-storey passenger cars) // Mater. I mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Vysokie intellektual'nye tehnologii v nauke i obrazovanii". SPb.: "Strategija budushhego", 2017. T. 1. Pp. 80-84.

4. Denisov A.N., Usmanov R.A. Metody operativnogo reagirovanija pozharno-spasatel'nyh podrazdelenij dlja zdanij povyshennoj jetazhnosti (Methods of rapid response fire and rescue units for high-rise buildings) // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti. Vyp. 4 (68). Pp. 89-94. 2016. http://academygps.ru/ttb.

5. Riznichenko G.Ju. Populjacionnaja dinamika (Population dynamics). http://www.library.biophys.msu.ru.