



УДК 371.315

В.И. Гуменюк, М.В. Гравит, А.М. Кармишин

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

V.I. Gumenuk, A.M. Gravit, A.M. Karmishin

PROBLEM QUESTIONS OF OPTIMIZATION MEANS AND METHODS FOREST FIRE EXTINGUISHING

В статье рассматриваются теоретические аспекты оптимизации средств и способов тушения лесных пожаров, наносящих большой материальный ущерб многим странам мира. В качестве средства тушения лесных пожаров рассматривается выливной авиационный прибор, а в качестве способа тушения — вылив огнетушащего состава из выливного прибора, расположенного на летательном аппарате.

ЛЕСНОЙ ПОЖАР; ВЫЛИВНОЙ ПРИБОР; ФАКТОРНЫЙ ЗАКОН ПРЕКРАЩЕНИЯ ОГНЯ; ОПТИМАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ОГNETУШАЩЕГО СОСТАВА; ПОЛИДИСПЕРСНОЕ ОБЛАКО; ПЛОТНОСТЬ ОТЛОЖЕНИЯ ОГNETУШАЩЕГО СОСТАВА; ОПТИМИЗАЦИЯ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ТУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА.

In the article examines theoretical aspects of optimization means and ways of extinguishing forest fires, causing great physical harm to many countries around the world. As a means of extinguishing of forest fires regarded spray tanks, and as a fire extinguishing agent — extinguishing agent of the having poured out of the pouring of the device located on aircraft.

WILDFIRE; POURER APPLIANCE; FACTORIAL LAW; CEASEFIRE; OPTIMAL DENSITY; EXTINGUISHING AGENTS SHALL; POLYDISPERSITY OF CLOUD; DEPOSITION DENSITIES EXTINGUISHING AGENT; OPTIMIZATION MEANS AND WAYS FOREST FIRE EXTINGUISHING.

Тушение лесных пожаров — одна из проблем многих стран мира, в том числе и Российской Федерации. Актуальность и сложность ее связана с тем, что лесные пожары наносят большой материальный ущерб и требуют значительных материальных затрат на тушение.

Большие масштабы пожаров, их труднодоступность при тушении и зачастую отдаленность от населенных пунктов и водоемов требуют разработки методов, способов и средств тушения. Одним из перспективных способов тушения лесных пожаров является вылив воды с летательных аппаратов, для чего должны быть разработаны соответствующие средства — выливные приборы (ВП).

Рассмотрим некоторые теоретические вопросы тушения пожара, позволяющие оптимизировать технические характеристики ВП и способы их применения.

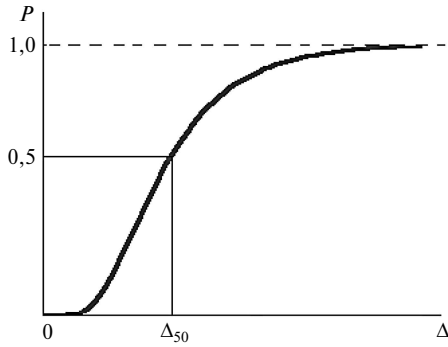
1. Используя некоторые аналогии с другими вопросами [1, 2], в рассмотрение можно ввести

такую количественную характеристику огнетушащего состава, которая и будет определять возможность прекращения огня, как масса огнетушащего состава, подаваемая на единицу площади горения. Поскольку тушение пожара — стохастический процесс, то связь между вероятностью прекращения горения и количеством Δ , г·м⁻², огнетушащего состава, подаваемого на единицу площади горения, может быть описана следующим образом (см. рис.):

$$P(\Delta) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_{\ln \Delta}} \ln \frac{\Delta}{\Delta_{50}} \right) \right], \quad (1)$$

где Δ_{50} и $\sqrt{k_{\ln \Delta}}$ — параметры закона.

Параметры закона (1) (Δ_{50} — масса огнетушащего состава, подаваемая на единицу поверхности, при которой горение прекращается с вероятностью 0,5, и $\sqrt{k_{\ln \Delta}}$) зависят от многих факторов и должны устанавливаться экспериментально. При прочих равных условиях пара-



Зависимость вероятности прекращения горения от количества огнетушащего состава, подаваемого на единицу площади горения

метр закона (1) Δ_{50} зависит от дисперсности частиц аэрозоля огнетушащего состава (воды).

Уже на уровне факторного закона прекращения горения (1) можно ввести в рассмотрение оптимальную плотность огнетушащего состава $\Delta_{\text{опт}}$, подаваемую на единицу поверхности пожара. Под оптимальной понимается такая плотность $\Delta_{\text{опт}}$, при которой вероятность прекращения горения в расчете на единицу плотности принимает максимальное значение, то есть

$$\frac{P}{\Delta} = \frac{0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_{\ln \Delta}} \ln \frac{\Delta}{\Delta_{50}} \right) \right]}{\Delta} = \max, \quad (2)$$

где $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$ — интеграл ошибок

Для нахождения оптимальной плотности $\Delta_{\text{опт}}$ найдем производную от уравнения (2) по Δ и приравняем ее к нулю. Результаты численного решения уравнения (2) относительно оптимальной величины $\Delta_{\text{опт}}$ и соответствующей ей оптимальной вероятности прекращения горения представлены в таблице.

2. Формирование плотностей отложения огнетушащего состава при его выливе из ВП. Как

известно, при выливе из ВП жидких составов образуется полидисперсная система частиц. Как показал академик А.Н. Колмогоров [3], при дроблении среды любым способом распределение образующихся частиц по их размерам асимптотически стремится к логарифмическому нормальному закону, откуда следует, что и распределение массы образующихся частиц аэрозоля по их размерам также описывается логарифмическим нормальным законом

$$f_m(d) = \frac{dm}{M_0 dd} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln d} d} e^{-\frac{\left(\ln \frac{d}{d_{em}}\right)^2}{2\sigma_{\ln d}^2}}, \quad (3)$$

где $f_m(d)$ — дифференциальная функция распределения массы вещества по размерам частиц (имеет размерность d^{-1}); $\sigma_{\ln d}$ — параметр закона (среднее квадратичное отклонение натурального логарифма d); d — диаметр частицы, выражаемый в единицах длины (наиболее часто размер частицы выражается в миллиметрах и микрометрах); d_{em} — параметр закона (медианный размер частиц).

Среднемассовый диаметр d_m образующихся при выливе частиц зависит от скорости полета самолета, диаметра выливного отверстия (d_b), физико-химических характеристик (σ — поверхностное натяжение, ρ — плотность, η — вязкость) огнетушащего состава, начальной скорости (относительно воздуха) вылива u , скорости вылива Q и может быть рассчитан по формуле М.К. Баранаева

$$d_m = 3,5 \left(\sqrt{\frac{\sigma}{u^2 \rho}} + 1,4 \sqrt{\frac{\eta}{u \rho}} \right) \sqrt[6]{\frac{Q d_b}{0,01 u}}. \quad (4)$$

Поскольку частицы различных размеров оседают под действием силы тяжести с различной скоростью, то из закона распределения массы частиц по их размерам следует закон распределения массы частиц по скоростям оседания $f_m(w)$. Существуют три режима оседания частиц

Оптимальное значение параметров огнетушения

$\sqrt{k_{\ln \Delta}}$	0,5	0,8	1,0	1,06	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
$\frac{\Delta_{\text{опт}}}{\Delta_{50}}$	0,30	0,89	1,11	1,15	1,34	1,31	1,27	1,21	1,17	1,14
$P_{\text{опт}}$	0,20	0,45	0,56	0,58	0,80	0,87	0,91	0,95	0,96	0,97

аэрозоля: стоксовский, промежуточный и ньютоновский. Стоксовский режим оседания характерен для маленьких, легких частиц, у которых можно пренебречь силами лобового сопротивления. Ньютоновский режим оседания частиц под действием силы тяжести характерен для крупных частиц, имеющих большую поверхность, у которых можно пренебречь силами вязкости воздуха. Промежуточный режим оседания частиц наблюдается у не очень крупных, но и не очень мелких частиц, у которых на скорость гравитационного оседания влияют и силы лобового сопротивления и силы вязкости воздуха. Скорость гравитационного оседания частицы может быть рассчитана по следующему уравнению:

$$\omega = \begin{cases} 31\rho d^2, & \text{— область Стокса;} \\ 4,2\rho^{0,715}d^{1,145} & \text{— промежуточная область;} \\ 4,9\rho^{0,5}d^{0,5} & \text{— область Ньютона,} \end{cases}$$

где d — диаметр частицы, мм; ρ — плотность частицы, г·см⁻³; w — скорость гравитационного оседания частицы, м·с⁻¹.

В дальнейшем образовавшаяся полидисперсная система частиц распространяется в атмосфере, формируя плотность отложения огнетушащего состава на поверхности земли, или в более общем случае — интегральный удельный поток примеси на высоте z . Исходя из теории оптимальных полей при выливе огнетушащего состава необходимо формировать линейный источник, расположенный перпендикулярно ветру. Плотность отложения полидисперсной системы частиц на поверхности земли может быть описана с использованием математических моделей рассеивания оседающей и взаимодействующей с подстилающей поверхностью монодисперсной примеси [4–10]. Так, для полидисперсной примеси

$$\Delta(x, y, z) = M_0 \varphi(y) \int_0^{\infty} \psi(x, 0, z, w, H, \beta) f_m(w) dw, \quad (5)$$

где $\varphi(y)$ и $\psi(x, 0, z, H, \beta)$ — функции, описывающие распределение огнетушащей примеси по осям y и z , имеющие соответственно размерность м⁻¹ и с·м⁻¹; $f_m(w)$ — плотность распределения массы образующихся при выливе частиц по скоростям гравитационного оседания, с·м⁻¹ (описывается логарифмическим нормальным законом).

Если каждую точку поля плотностей распределения огнетушащей смеси перевести в вероятность прекращения горения, то получим некоторое поле вероятностей $G(x, y, z)$, которое служит наиболее полным показателем качества выливного прибора. Интегральным показателем качества ВП является условная площадь S_0 , в пределах которой вероятность тушения пожара равна единице

$$S_0 = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} G(x, y, z = \text{const}) dx dy.$$

При реальных условиях тушения лесных пожаров именно этот показатель требует оптимизации, а именно его максимизации.

Создание оптимальных плотностей огнетушащего состава достигается применением нескольких летательных аппаратов, которые должны выливать огнетушащие составы с оптимальным смещением по оси x , в результате чего будет происходить наложение полей и формироваться оптимальная плотность отложения огнетушащего состава.

Исходя из физического смысла S_0 интегральный показатель качества ВП позволяет решать различные прикладные задачи, имеющие важное практическое значение:

оптимизировать технические характеристики ВП (диаметр выливного отверстия, скорость вылива и, соответственно, длину вылива);

для заданных условий пожара оптимизировать способ применения ВП — высоту вылива, скорость полета самолета;

рассчитывать необходимое количество средств (самолетовылеты) для тушения пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармишин А.М., Киреев В.А. Математические методы фармакологии, токсикологии и радиобиологии: монография. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ООО «АПР», 2011. 330 с.

2. Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Оценка опасности воздействия опасных факторов пожара // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Тезисы докладов XXI Меж-

дународной научно-практической конференции. Ч. 1. М.: Изд-во ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. С. 16–21.

3. **Колмогоров А.Н.** О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. 1941. Т. 31, № 2. С. 99.

4. **Гандин Л.С., Соловейчик Р.Э.** О распространении дыма из фабричных труб // Труды ГГО. Вып. 77.

5. **Монин А.С.** О граничном условии на поверхности земли для диффундирующей примеси в приземном слое воздуха при устойчивой стратификации // В кн.: Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. С. 477–478.

6. **Бызова Н.Л., Куценогий К.П.** Влияние структуры приземного слоя атмосферы и граничного условия на величину дозы и плотность отложений аэрозольной примеси // Труды ИЭМ. 1976. Vol. 60. Вып. 15. С. 5–15.

7. **Кармишин А.М., Карнюшкин А.И., Киреев В.А.** Актуальные проблемы оценки простран-

ственно-временных показателей опасности техногенных аварий // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: VIII научно-практическая конференция. 8–10 октября 2008 г. Доклады и выступления. СПб.: Изд-во УГПС МЧС России, 2009. С. 199–210.

8. **Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И.** О количественных показателях опасности техногенных аварий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2(171). С. 289–299.

9. **Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И.** Оценка пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сб. науч. тр. V всеросс. научно-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 70–77.

10. **Кармишин А.М., Киреев В.А., Карнюшкин А.И. [и др.]** К вопросу об оценке опасных факторов пожара // Проблемы прогнозирования ЧС. — IX РПК 14–15 мая 2009 г. Проблемы прогнозирования ЧС. — М.: Центр «Антистихия», 2009. С. 158–163.

REFERENCES

1. **Karmishin A.M., Kireyev V.A.** Matematicheskiye metody farmakologii, toksikologii i radiobiologii: monografiya. Izd. 2-e, pererab. i dop. — M.: ООО «APR», 2011. 330 s. (rus.)

2. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Karnyushkin A.I.** Otsenka opasnosti vozdeystviya opasnykh faktorov pozhara. Aktualnyye problemy pozharной bezopasnosti: Tezisy dokladov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ch. 1. M.: Izd-vo FGU VNIPO MChS Rossii, 2009. S. 16–21. (rus.)

3. **Kolmogorov A.N.** O logarifmicheski-normalnom zakone raspredeleniya razmerov chastits pri droblenii. DAN SSSR. 1941. T. 31, №2. S. 9. (rus.)

4. **Gandin L.S., Soloveychik R.E.** O rasprostraneni dyma iz fabrichnykh trub. — *Trudy GGO*. Вып. 77. (rus.)

5. **Monin A.S.** O granichnom uslovii na poverkhnosti zemli dlya diffundiruyushchey primesi v prizemnom sloye vozdukha pri ustoychivoy stratifikatsii. V kn.: *Atmosfernaya diffuziya i zagryazneniye vozdukha*. M. Izd-vo inostrannoy literatury, 1962. S. 477–478. (rus.)

6. **Byzova N.L., Kutsenogiy K.P.** Vliyaniye struktury prizemnogo sloya atmosfery i granichnogo usloviya na velichinu dozy i plotnost otlozheniy aero-

zolnoy primesi. *Trudy IEM*. 1976. Вып. 15 (60). S. 5–15. (rus.)

7. **Karmishin A.M., Karnyushkin A.I., Kireyev V.A.** Aktualnyye problemy otsenki prostranstvenno-vremennykh pokazateley opasnosti tekhnogennykh aviariy. *Problemy prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy. VIII nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 8–10 oktyabrya 2008 g. Doklady i vystupleniya*. SPb.: Izd-vo UGPS MChS Rossii, 2009. S. 199–210.

8. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Gumenyuk V.I.** O kolichestvennykh pokazatelyakh opasnosti tekhnogennykh aviariy. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 2(171). S. 291–299.

9. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Gumenyuk V.I.** Otsenka prostranstvenno-vremennykh pokazateley opasnosti tekhnogennykh aviariy. *Bezopasnost v chrezvychaynykh situatsiyakh: sbornik nauchnykh trudov V vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013. S. 70–77. (rus.)

10. **Karmishin A.M., Kireyev V.A., Karnyushkin A.I. [i dr.]** K voprosu ob otsenke opasnykh faktorov pozhara. *Problemy prognozirovaniya ChS. — IX RPK 14–15 maya 2009 g. Problemy prognozirovaniya ChS*. M.: Tsentr «Antistikhiya», 2009. S. 158–163. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна — кандидат технических наук доцент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: marina.gravit@mail.ru

КАРМИШИН Александр Михайлович — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

AUTHORS

GUMENYUK Vasily I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

GRAVIT, Marina V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: marina.gravit@mail.ru

KARMISHIN Alexander M. — Doctor of Science, Professor; Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru