

*Р.Г. Мелешенко, преподаватель, НУГЗУ,
В.К. Мунтян, к.т.н., доцент, зав. каф., НУГЗУ,
В.В. Коврегин, к.т.н., доцент, проректор, НУГЗУ*

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОГО БАРЬЕРА СОВМЕСТНЫМИ УСИЛИЯМИ АВИАЦИОННЫХ И НАЗЕМНЫХ СИЛ

(представлено д-ром техн. наук Тарасенко А.А.)

Методами имитационного моделирования осуществлена проверка адекватности ранее полученной аналитической модели скорости создания непрерывного локализационного барьера сбросами воды с самолетов АН-32П совместно с наземными силами, ликвидирующими разрывы между водяными пятнами.

Ключевые слова: пожарный самолет АН-32П, противопожарный барьер, водяное пятно, имитационная модель, метод Монте-Карло.

Постановка проблемы. Для отыскания оптимальных параметров сбросов воды с пожарного самолета АН-32П с целью создания непрерывного противопожарного барьера совместно с наземными силами пожаротушения в работе [1] получена модель скорости создания данного барьера, которая базируется на ряде допущений, в связи с чем модель нуждается в проверке адекватности. При этом подтверждение достоверности модели путем проведения натуральных экспериментов не представляется возможным в силу их высокой стоимости.

Анализ последних исследований и публикаций. В литературе математические модели противопожарного барьера, создаваемого сбросами воды с пожарных самолетов представлены эпизодически. Можно отметить лишь работы [2], базирующиеся на детерминированных представлениях о характере распределения центров сбрасываемых водяных ядер и о форме водяных пятен.

Детерминированные представления приводят к ошибочному выводу о возможности создания непрерывного противопожарного барьера усилиями одних лишь авиационных сил (что подтверждается в [3]). Соответственно, расчет сил и средств, базирующийся на такой модели приводит к ошибочным результатам.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является подтверждение ранее полученной аналитической модели скорости создания непрерывного локализационного барьера сбросами воды с самолетов АН-32П совместно с наземными силами, ликвидирующими разрывы между водяными пятнами, путем установления степени совпадения результатов с оценками, которые могут быть получены при проведении серии компьютерных экспериментов, воспроизводящих натурные условия.

В работе [1] на основании предложенной аналитической модели рассчитан массив $[M_R^{kqp}] = [M_R(H_k, \delta_q^*, d_p)]_{k=0..30, q=0..10, p=1..65}$ значений математического ожидания величины разрыва $R(H, \delta^*, d)$ между водяными пятнами при дискретном варьировании параметров в трехмерном интервале $40 \text{ м} \leq H \leq 70 \text{ м}$, $0.1 \text{ мм} \leq \delta^* \leq 5.1 \text{ мм}$, $2 \text{ м} \leq d \leq 130 \text{ м}$ (H (м) – высота самолета в момент сброса воды (по показаниям высотомера); δ^* (мм) – толщина слоя воды; d (м) – дистанция (детерминированная), задаваемая штурманами между двумя последовательными сбросами воды). Данные разрывы ликвидируются наземными силами, а их величина влияет на скорость создания противопожарного барьера.

Данная модель базируется на ряде допущений. В частности, водяное пятно аппроксимируется кусочной гауссовой функцией и его форма полагается детерминированной (описывается биэллипсом, параметры которого функционально зависят от высоты сброса и толщины слоя воды).

В тоже время, как показано в работе [4], отклонение координат центров водяных пятен от точки прицеливания подчиняются двумерному нормальному распределению (в [4] найдена плотность распределения данных отклонений и получены зависимости параметров плотности от высоты сброса). При этом форма водяного пятна является случайной и параметры пятна зависят от высоты сброса не функционально, а статистически.

В основу компьютерных экспериментов положено допущение, что за время между сбросами параметры соседних водяных пятен остаются неизменными. Данное предположение реализуется, если пожар подходит к водяному пятну за время, которое не превышает 15 мин [5] с момента сброса.

В этом случае можно осуществлять суммирование водяных слоев всех $k = 1..K$ случайных реализаций сбросов в виде

$$\delta_{\Sigma}(x, y, H, d) = \sum_{k=1}^K \tilde{\delta}_k(x - \tilde{x}_k - d \cdot k, y - \tilde{y}_k, H), \quad (1)$$

где $\tilde{\delta}_k(x, y, H)$ (мм) – случайная реализация водяного пятна k -ого сброса (пространственное распределение толщины слоя воды δ) (см. ниже); $(\tilde{x}_k + d \cdot k; \tilde{y}_k)$ (м) – случайные координаты точки падения центра k -ого водяного пятна, имеющие отклонения от точки прицеливания с плотностью вероятности [4]

$$f_{\Delta x \Delta y}(H, x, y) = \frac{1}{0.14744\pi H^2} \exp\left(-\frac{x^2}{0.2888H^2} - \frac{y^2}{0.0753H^2}\right), \quad (2)$$

числовые параметры которой получены из анализа экспериментальных данных [6].

Высота H самолета определяет параметры прицельности и водяного пятна. Точность определения высоты лимитирована погрешностью высотомера (для радиовысотомеров РВ-5М и А-053, установленных на Ан-32П погрешность на высоте 40-70 м при горизонтальном полете и углах крена и тангажа не более 15° составляет $\Delta\check{H} = \pm 2$ м [7]).

Согласно [8], это означает, что отклонение истинного значения высоты \check{H} от показания высотомера H лежит в границах доверительного интервала ± 2 м с надежностью 0,95.

Данное положение позволяет определить среднеквадратическое отклонение нормально распределенной случайной величины – отклонения высоты $H - \check{H}$ из решения уравнения [9]

$$2\Phi\left(\frac{\Delta\check{H}}{\sigma_{\Delta\check{H}}}\right) = P(|H - \check{H}| < \Delta\check{H}) = 0.95, \quad (3)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ – функция Лапласа.

Решение данного уравнения с помощью таблиц значений функции Лапласа [9] позволило отыскать $\sigma_{\Delta\check{H}} \approx 1$ м, что в свою очередь позволяет получить случайные нормально распределенные реализации высоты сброса $\check{H} = N(H, \sigma_{\Delta\check{H}})$.

Координаты текущего местоположения самолета (в плане) определяются с помощью GPS-навигатора GARMIN GPSMAP 195 и GARMIN GPS III PILOT, точность которых $\Delta x = \Delta y = 0.1'' = 3$ м [10]. Соответственно $\sigma_{\Delta x} = \sigma_{\Delta y} \approx 1.5$ м (при надежности 0,95). По информации, полученной от пилотов и штурманов АН-32П, данный тип самолетов является хорошо управляемым, что обеспечивает возможность точного выведения самолета в точку позиционирования (согласно показаниям навигационных приборов). Следует отметить, что модель (2) получена уже с учетом возможных случайных отклонений истинных значений высоты и координат от значений, фиксируемых бортовыми приборами. В связи с этим, нет необходимости отдельно учитывать данные отклонения.

В работе [6] на основе экспериментальных данных, полученных sup-and-grid методом [12], была предложена модель водяного пятна. Поскольку, согласно описанному в [6] натурному эксперименту, для каждой n -ой ($n=1 \dots 16$) серии (с шагом по высоте 2 м в интервале от 40 до 70 м) осуществлялось по три сброса ($m=1..3$), это позволило для каждой из серий найти среднее значение и дисперсию толщины слоя δ_{ij} воды в каждом ij -ом узле (приведенном к системе координат, связан-

ной с пиком толщины слоя воды) n -ой серии. Предполагая нормальный характер данных распределений, разыгрывалось случайное слагаемое $\hat{\delta}_{ij}^n$ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой по экспериментальным данным.

После чего были получены случайные реализации толщины слоя воды в каждом ij -ом узле $\frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 \delta_{ij}^{mn} + \hat{\delta}_{ij}^n$ для каждого n -ого дискретного значения высоты сброса. Данные случайные реализации интерполировались по Кунсу [13] в виде $\tilde{\delta}_n(x, y, H)$.

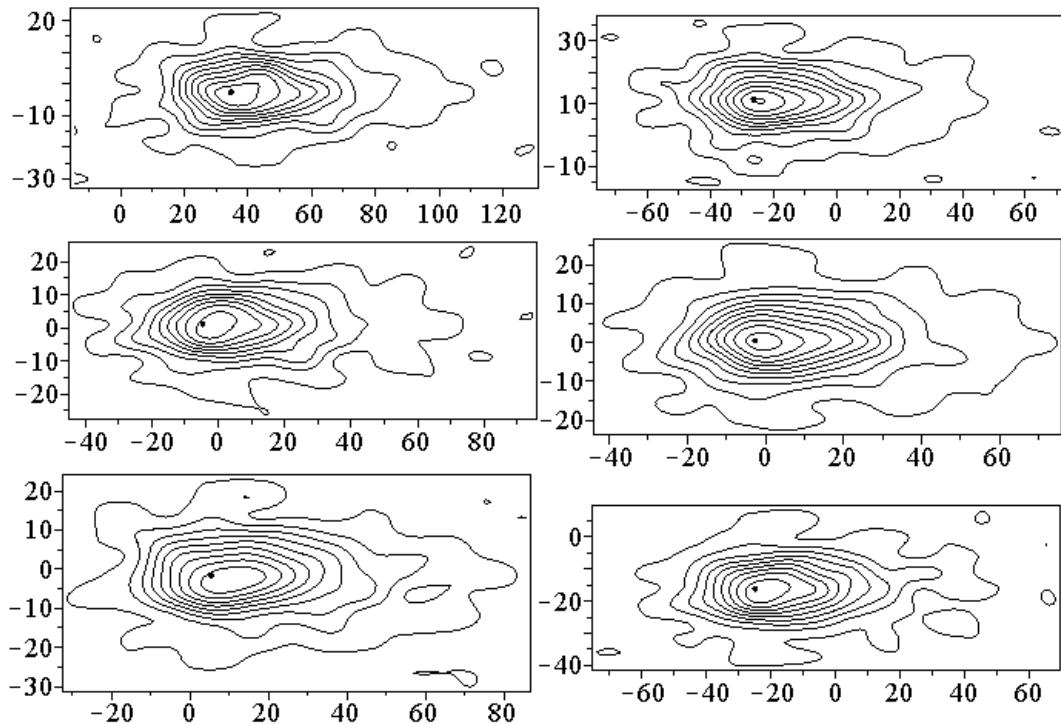


Рис. 1. Примеры случайных реализаций водяного пятна при сбросе с $H = 46$ м

На рис. 1 представлены примеры случайных реализаций водяных пятен $\delta(x, y)$, полученные при одной и той же высоте сброса (линии уровня соответствуют толщине слоя воды $\delta = 0.1 + m \cdot 0.5$ мм, $m = 1, 2, 3, \dots$).

Разыгрывание случайных величин с заданными распределениями осуществлялась на основании использования метода Монте-Карло [14].

Таким образом, условия проведения компьютерного эксперимента отражают реальные особенности получения противопожарного барьера – реализованы случайные (вокруг точки прицеливания) координаты падения центра сброса и случайная реализация самого сброса (распределение слоя воды), а также учтены погрешности, связанные с точностью позиционирования самолета.

Пример одной случайной реализации (1) проиллюстрирован на рис. 2.

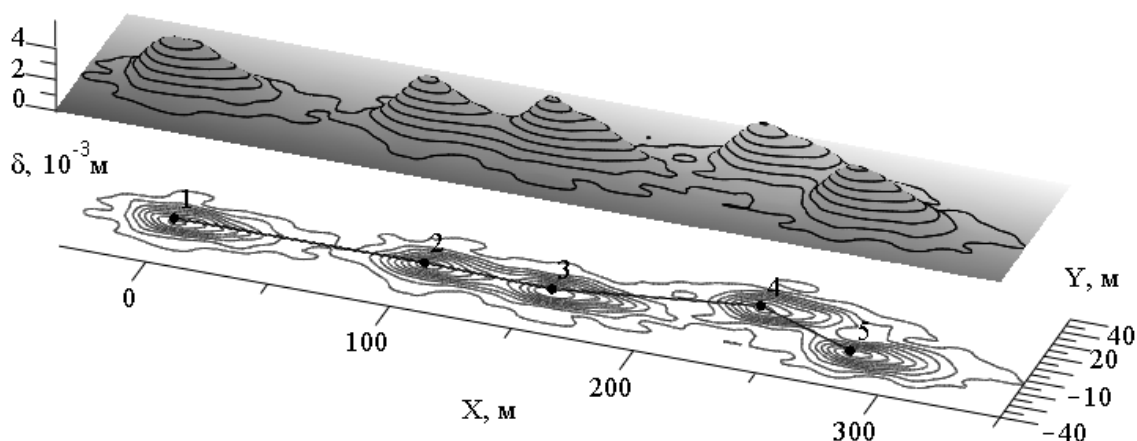


Рис. 2. Фрагмент случайной реализации $\delta_{\Sigma}(x, y)$ слоя воды цепочки водяных пятен при $H = 46$ м, $d = 60$ м

На рис. 3 приведен «срез» при $\delta^* = 10^{-3}$ м поверхности $\delta_{\Sigma}(x, y, H, d)$ для другой случайной реализации.

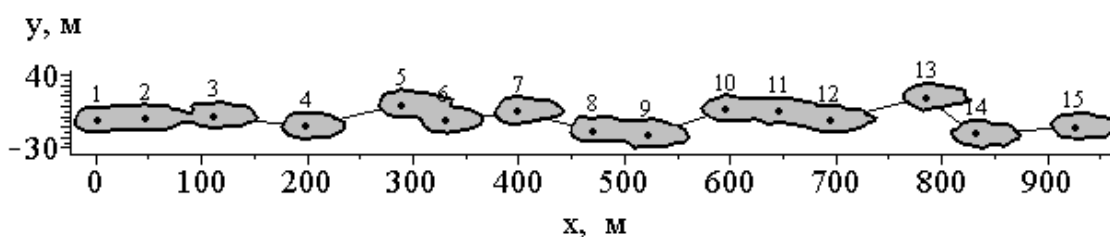


Рис. 3. Границы водяных пятен при $\delta^* = 10^{-3}$ м

Использование имитационного моделирования [14], основанного на методе Монте-Карло, совместно с полученными ранее моделями рассеивания центра пятна и моделями водяного пятна позволяет найти усредненные характеристики барьеров, получаемых на основании моделей [1] и тем самым подтвердить адекватность этих моделей.

Для этого осуществлялось нахождение величины разрыва между сбросами $\hat{R}(H, \delta^*, d)$ по полученным случайным реализациям (данные разрывы на рис. 3 изображены отрезками). Для каждой пары сброшенных пятен использовались решения системы неявных уравнений контура цепочки пятен и прямой, соединяющей центры (случайные) пятен,

$$\begin{cases} \delta_{\Sigma}(x, y) = \delta^*; \\ \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} = \frac{y - y_k}{y_{k+1} - y_k}. \end{cases} \quad (4)$$

Для решения (4) уравнение $\delta_{\Sigma}(x, y) = \delta^*$ записывалось в параметрическом виде, а именно – в виде линейной сплайн-интерполяции коор-

динат вершин данной линии [15]. Получение координат, в свою очередь, осуществлялось с помощью графического инструментария пакета Maple.

Для каждой фиксированной тройки значений H_k, δ_q^*, d_p осуществлялось N (полагалось $N=10$) случайных реализаций для двух соседних пятен и находились значения величины $\hat{R}_n(H_k, \delta_q^*, d_p)$, для которых находилось математическое ожидание $M_{\hat{R}}^{kqp}$ и исправленное среднеквадратичное отклонение $S_{\hat{R}}^{kqp}$, что позволяет, задавая уровень надежности γ (полагалось $\gamma = 0,95$), находить доверительный интервал для оценки величины истинного значения математического ожидания $M_{\tilde{R}}$ (по Стьюденту)

$$M_{\hat{R}} - \frac{S_{\hat{R}}}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N} \leq M_{\tilde{R}} \leq M_{\hat{R}} + \frac{S_{\hat{R}}}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N}, \quad (5)$$

где $t_{\gamma, N} \Big|_{\substack{\gamma=0.95 \\ N=10}} = 2.26$ [11] для каждого значения $k = 0..30, q = 0..10, p = 1..65$.

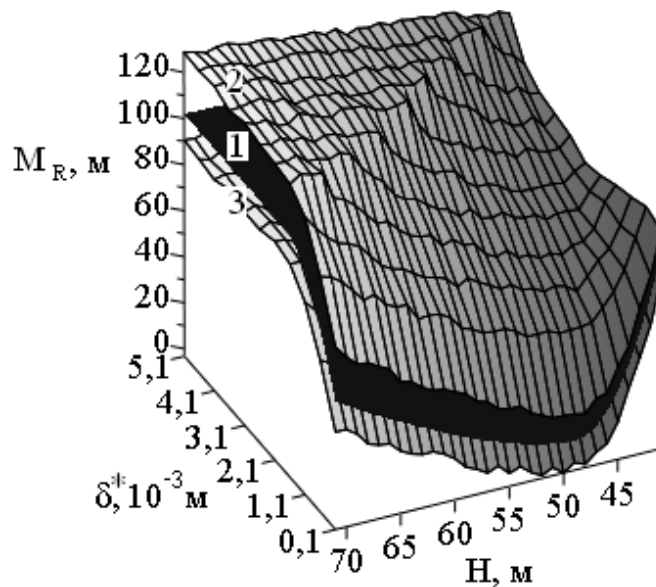


Рис. 4. Иллюстрация выполнения условия (5). Поверхности: 1 – $M_R(H, \delta^*)$ [1]; 2 – $M_{\hat{R}}(H, \delta^*) + \frac{S}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N}$; 3 – $M_{\hat{R}}(H, \delta^*) - \frac{S}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N}$

Принадлежности значения M_R [1] границам доверительного интервала (5), т.е. выполнение условия

$$M_{\hat{R}} - \frac{S}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N} \leq M_R \leq M_{\hat{R}} + \frac{S}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N} \quad (6)$$

подтверждает адекватность моделей [1] (пример выполнения условия (6) при $d = 100$ м представлен на рис. 4).

Выводы. Путем проведения серии компьютерных экспериментов, воспроизводящих реальные условия создания противопожарного барьера, доказана адекватность аналитической модели [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешенко Р.Г. Моделирование скорости создания противопожарного барьера при взаимодействии наземных и авиационных сил пожаротушения / Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян // Проблемы пожарной безопасности. – Вып. 36. – Харьков: НУГЗУ, 2014. – С. 155-164.
2. Suter A. Drop testing airtankers: a discussion of the cup-and-grid method / A. Suter // Technology & Development Program, USDA Forest Service, Missoula, Montana. 2000. – 18 p.
3. Коршунов Н. Авиационное тушение лесных пожаров: эффективность репортажей и эффективность технологий / Н. Коршунов // Авиапанорама. – № 4, 2011. – С. 10-13.
4. Мелешенко Р.Г. Исследование точности сброса воды с пожарного самолета Ан-32П / Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян, // Чрезвычайные ситуации: образование и наука: международный научн. пр. журнал. – Том 9. – №1. – Гомель: ГИИ МЧС Республики Беларусь, 2014. – С. 3-9.
5. Модин В.И. Методика расчета основных параметров противопожарных полос, создаваемых антипиренами // Лесные пожары и борьба с ними: Сб. науч. тр.; ЛенНИИЛХ, 1989. – С. 93-99.
6. Мелешенко Р.Г. Статистический анализ модели параметров сброса воды с пожарного самолета Ан-32П / Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян // Проблемы пожарной безопасности. – Вып. 35. – Харьков: НУГЗУ, 2013. – С.151-163.
7. Самолет Ил-62. Радиоэлектронное оборудование. – Казань: КГТУ, 2013. – 56 с.
8. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
10. Руководство-справочник пилота GPSMAP 195 GARMIN [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.garminych.ru/products_docs/Gps195.doc.
11. Руководство по летной эксплуатации Ан-32П. Киев: 1989.
12. Hodgson B.S. A procedure to evaluate ground distribution patterns for water dropping aircraft / B.S. Hodgson // Forest Fire Research Institute: Information Report FF-X-9, 1967. – 74 p.

13. Алберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш – М.: Мир, 1972. – 316 с.

14. Таха Х. Введение в исследование операций. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 912 с.

15. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 927 с.

Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян, В.В. Коврегін

Імітаційна модель створення протипожежного бар'єру спільними зусиллями авіаційних та наземних сил

Методами імітаційного моделювання здійснено перевірку адекватності раніше отриманої аналітичної моделі швидкості створення безперервного локалізаційного бар'єру скидами води з літаків АН-32П спільно з наземними силами, що ліквідують розриви між водяними плямами.

Ключові слова: пожежний літак Ан-32П, протипожежний бар'єр, водяна пляма, імітаційна модель, метод Монте-Карло.

R.G. Meleschenko, V.K. Mountyan, V.V. Kovregin

Simulation model creation fire barriers together aviation and ground forces

By simulation adequacy test performed previously obtained analytical model creation speed continuous localization barrier discharges water from aircraft An-32P conjunction with ground forces that bridges the gap between water spots.

Keywords: fire plane An-32F, fire barrier, water spot, simulation model, method of Monte-Carlo.