

*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);  $\delta^*$  (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  $\delta$ ) (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  $15^\circ$  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  $\pm 2$  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.

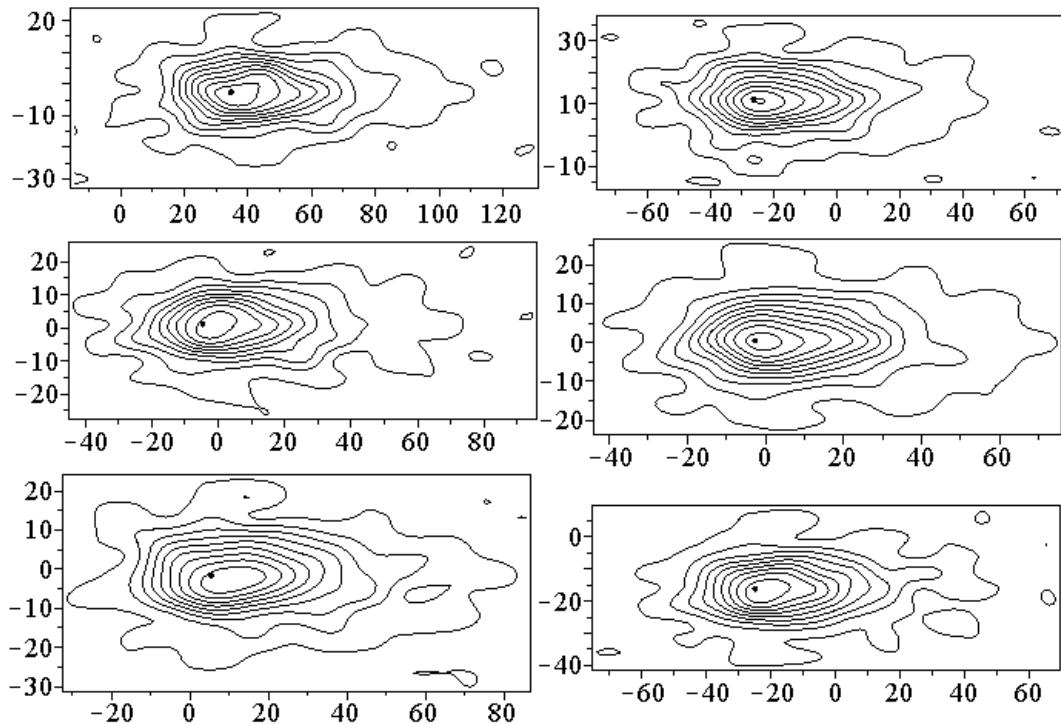
Решение данного уравнения с помощью таблиц значений функции Лапласа [9] позволило отыскать  $\sigma_{\Delta\check{H}} \approx 1$  м, что в свою очередь позволяет получить случайные нормально распределенные реализации высоты сброса  $\check{H} = N(H, \sigma_{\Delta\check{H}})$ .

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  $\delta_{ij}$  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.

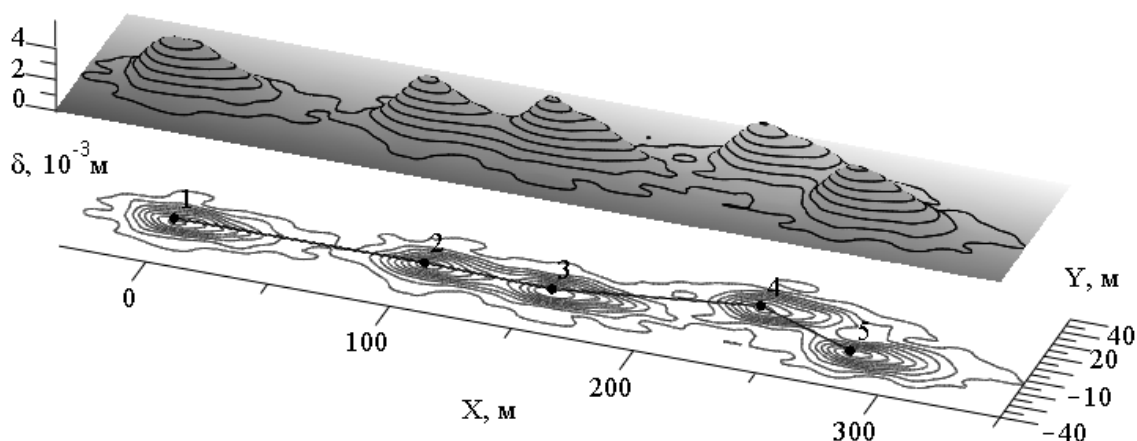


Рис. 2. Фрагмент случайной реализации  $\delta_{\Sigma}(x, y)$  слоя воды цепочки водяных пятен при  $H = 46$  м,  $d = 60$  м

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

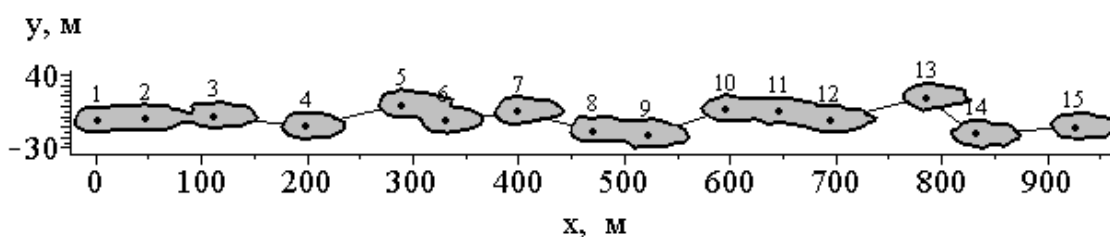


Рис. 3. Границы водяных пятен при  $\delta^* = 10^{-3}$  м

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  $H_k, \delta_q^*, d_p$  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  $\gamma$  (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  $k = 0..30, q = 0..10, p = 1..65$ .

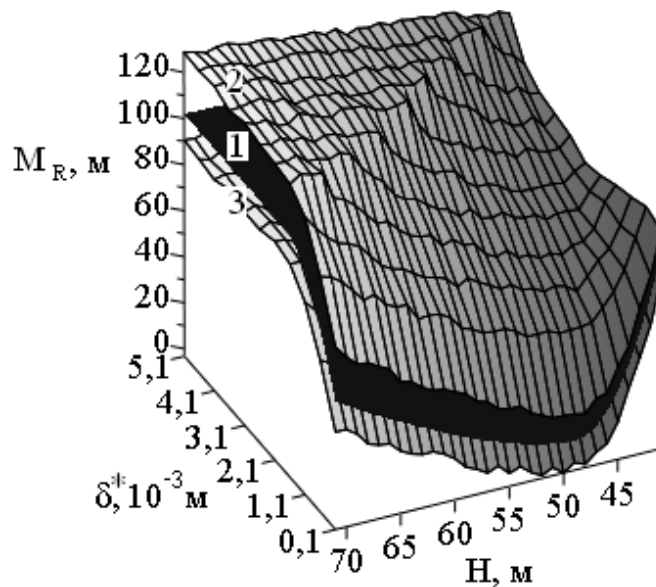


Рис. 4. Иллюстрация выполнения условия (5). Поверхности: 1 –  $M_R(H, \delta^*)$  [1]; 2 –  $M_{\hat{R}}(H, \delta^*) + \frac{S}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N}$ ; 3 –  $M_{\hat{R}}(H, \delta^*) - \frac{S}{\sqrt{N}} t_{\gamma, N}$

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](http://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.