

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОГО БАРЬЕРА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАЗЕМНЫХ И АВИАЦИОННЫХ СИЛ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

(представлено д-ром техн. наук Комяк В.М.)

Предложена вероятностная модель скорости создания непрерывного противопожарного барьера – переувлажненной полосы, создаваемой сбросами воды с самолетов АН-32П совместно с наземными силами, ликвидирующими разрывы между водяными пятнами.

Ключевые слова: пожарный самолет, противопожарный барьер, водяное пятно.

Постановка проблемы. В Украине для борьбы с ландшафтными пожарами привлекаются самолеты А-32П. Высокая стоимость эксплуатации авиационных средств приводит к необходимости повышения эффективности их использования. Для расчета необходимого количества сил и средств для локализации ландшафтного пожара необходимо располагать данными для скорости создания противопожарного барьера.

Самолет АН-32П оснащен системой мгновенного сброса и способен осуществлять сбросы 8 т воды, что, в отличие от больших авиатанкеров, приводит к образованию достаточно компактных водяных пятен. При этом для данного типа системы сброса характерна низкая степень прицельности. Эти факторы приводят к невозможности гарантированного создания непрерывной цепочки сбросов и, как следствие, – к невозможности создания непрерывного противопожарного барьера с помощью одних лишь сбросов воды. Поэтому неизбежно возникающие разрывы между водяными пятнами ликвидируются наземными силами пожаротушения, в виду чего скорость создания противопожарного барьера определяется не только параметрами сбросов, но и производительностью наземных сил.

Анализ последних исследований и публикаций. Прделанный обзор литературных данных продемонстрировал отсутствие моделей скорости создания противопожарных барьеров совместными усилиями авиационных и наземных сил.

Ранее в работах [1-2] получены модели водяного пятна и прицельности сброса воды с пожарного самолета АН-32П, которые являются основой для создания предлагаемой ниже модели.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является получение модели скорости создания противопожарной полосы, образуемой водяными пятнами от сбросов воды с пожарных самолетов АН-32П, разрывы между которыми устраняются наземными силами пожаротушения.

Будем полагать, что необходимо осуществлять сбросы вдоль наме-

ченной линии (линии противопожарного барьера [3]), при этом водяные пятна (аппроксимированные ранее в [2] в виде биэллипсов с полуосями a_1, a_2, b , которые являются функциями высоты H и толщины слоя воды δ^*) будут ориентированы большими полуосями параллельно ей. В упрощенной постановке данная линия может быть прямой, совпадающей с осью OX , при этом будем полагать, что целью сбросов воды является создание противопожарного заслона в положительном направлении оси OX .

Пусть координаты точки прицеливания первого сброса $(x_0^1; y_0^1)$, а координаты точки прицеливания второго сброса $(x_0^2; y_0^2)$.

Будем исходить из положения, что возникающие вследствие случайного характера координат точек сбросов разрывы локализационной полосы между соседними сбросами ликвидируются наземными силами пожаротушения, которые соединяют водяные пятна противопожарными барьерами теми средствами, которые находятся у них на вооружении.

В упрощенной постановке для одной пары сбросов данный разрыв может быть интерпретирован как отрезок, соединяющий биэллипсы L_1 и L_2

$$L_{1,2}(x, y, x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) = \begin{cases} \frac{(x - x_0^{1,2})^2}{a_2^2} + \frac{(y - y_0^{1,2})^2}{b^2} = 1, & x < 0; \\ \frac{(x - x_0^{1,2})^2}{a_1^2} + \frac{(y - y_0^{1,2})^2}{b^2} = 1, & x \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

вдоль неявно заданной прямой P , соединяющей центры биэллипсов,

$$P(x, y, x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) = \frac{x - x_0^1}{x_0^2 - x_0^1} - \frac{y - y_0^1}{y_0^2 - y_0^1} = 0. \quad (2)$$

Решая систему уравнений

$$L_{1,2}(x, y, x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) = P(x, y, x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) \quad (3)$$

относительно x и y , получим точки пересечения прямой с биэллипсами

$$\begin{aligned} X_{1,2}(x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) &= x_0^{1,2} \pm \frac{a_{1,2}b |x_0^1 - x_0^2|}{\sqrt{a_{1,2}^2 (y_0^1 - y_0^2)^2 + b^2 (x_0^1 - x_0^2)^2}}; \\ Y_{1,2}(x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) &= y_0^{1,2} \pm \frac{a_{1,2}b |y_0^1 - y_0^2|}{\sqrt{a_{1,2}^2 (y_0^1 - y_0^2)^2 + b^2 (x_0^1 - x_0^2)^2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Два пятна могут как перекрываться, так и нет (рис. 1). Поэтому величина разрыва R будет определяться выражением

$$R(x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) = \begin{cases} 0, & \text{если } (x_0^2; y_0^2) \in \Omega_{(x_0^1; y_0^1)}; \\ \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}, & \text{если } (x_0^2; y_0^2) \notin \Omega_{(x_0^1; y_0^1)}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\Omega_{(x_0^1; y_0^1)}$ – Ω -окрестность точки $(x_0^1; y_0^1)$. Нахождение границ данной области осуществлено ранее в [4].

Выполнение условия (5) удобно производить в полярных координатах (с полюсом в точке $(x_0^1; y_0^1)$), сравнивая длину полярного радиуса точки $(x_0^2; y_0^2)$ с полярным радиусом, находимым из уравнения границы области $\bar{\Omega}_{(x_0^1; y_0^1)}$ [4]).

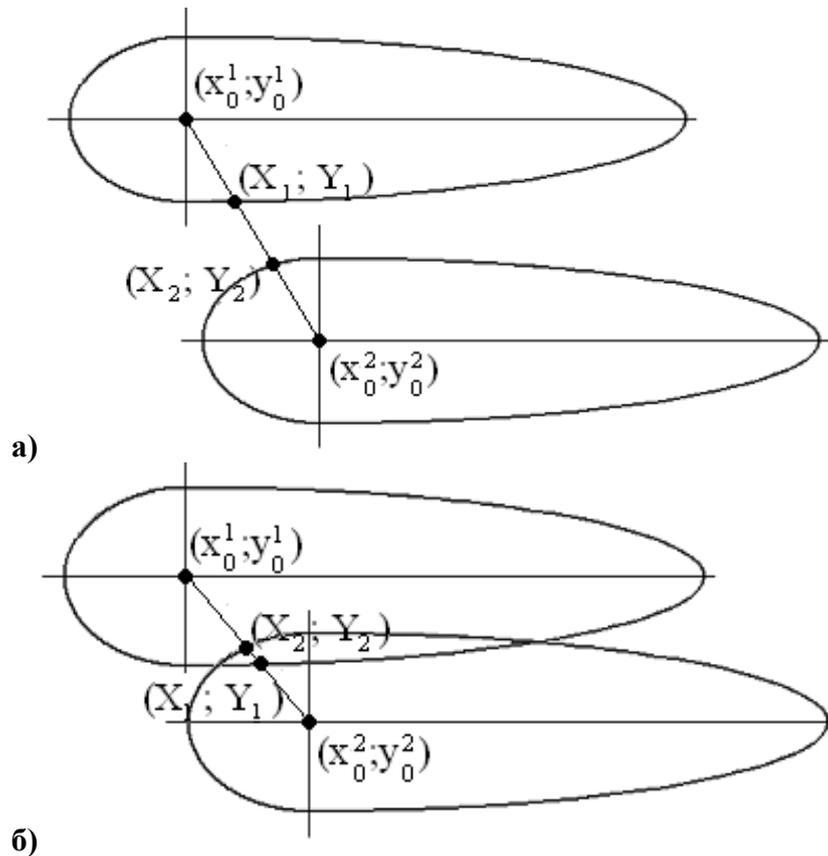


Рис. 1. Возможные взаимные расположения двух водяных пятен: а) наличие разрыва; б) перекрытие

Двумерные плотности вероятностей отклонения случайных точек – координат падения центров данных водяных пятен от точек прицеливания задаются выражениями

$$f^{1,2}(x - x_0^{1,2}, y - y_0^{1,2}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Delta x}\sigma_{\Delta y}} \exp\left(-\frac{(x - x_0^{1,2})^2}{2\sigma_{\Delta x}^2} - \frac{(y - y_0^{1,2})^2}{2\sigma_{\Delta y}^2}\right), \quad (6)$$

где значения $\sigma_{\Delta x} = 0.380 H$; $\sigma_{\Delta y} = 0.194 H$ получены ранее в работе [1] (H – высота сброса, $40 м \leq H \leq 70 м$).

Математическое ожидание M_R длины разрыва R между двумя водяными пятнами будет определяться выражением [5]

$$M_R(x_0^{1,2}, y_0^{1,2}) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \left[f_{\Delta x \Delta y}^1(s - x_0^1, t - y_0^1) \cdot f_{\Delta x \Delta y}^2(u - x_0^2, v - y_0^2) \times \right. \\ \left. \times R(s, t, u, v) \right] ds dt du dv. \quad (7)$$

Поскольку сбросы осуществляются вдоль оси OX через расстояние d , то $y_0^{1,2} = 0$. Также полагая $x_0^1 = 0$, получаем $x_0^2 = x_0^1 + d = d$. Поэтому, в силу (4), в результате получаем, что $M_R = M_R(H, \delta^*, d)$. Таким образом, средняя длина разрыва зависит от величины d – расстояния (дистанции) между точками прицеливания вдоль локализационной линии, а также от высоты сброса и необходимой толщины водяного слоя.

В силу сложности подынтегрального выражения в (7), вычисление интеграла осуществлялось численно методом прямоугольников на множестве дискретных значений H , δ^* и d

$$M_R(H_k, \delta_q^*, d_p) \approx \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N f_{\Delta x \Delta y}^1(S_i, T_j) f_{\Delta x \Delta y}^2(U_n - d, V_m) \times \\ \times R(S_i, T_j, U_n, V_m) \Delta s \Delta t \Delta u \Delta v, \quad (8)$$

где

$$S_i = -3\sigma_{\Delta x} + i \cdot \frac{6\sigma_{\Delta x}}{N}; \quad T_j = -3\sigma_{\Delta y} + j \cdot \frac{6\sigma_{\Delta y}}{N};$$

$$U_n = d - 3\sigma_{\Delta x} + n \cdot \frac{6\sigma_{\Delta x}}{N}; \quad V_m = -3\sigma_{\Delta y} + m \cdot \frac{6\sigma_{\Delta y}}{N}; \quad \Delta s = \frac{6\sigma_{\Delta x}}{N};$$

$$\Delta t = \frac{6\sigma_{\Delta y}}{N}; \quad \Delta u = \frac{6\sigma_{\Delta x}}{N}; \quad \Delta v = \frac{6\sigma_{\Delta y}}{N}.$$

Перечисленные величины (значения которых выбирались исходя из правила « 3σ ») в свою очередь находились при фиксированных значениях $H_k = 40 м + k \cdot \Delta H$, ($k=0..30$, $\Delta H = 1 м$); $\delta_q^* = 10^{-4} м + q \cdot \Delta \delta^*$, ($q=0..10$, $\Delta \delta^* = 5 \cdot 10^{-4} м$); $d_p = p \cdot \Delta d$, ($p=1..65$, $\Delta d = 2 м$). Значение N

полагалось равным 10 (выбиралось из соотношения точности и времени вычисления (8)), поскольку различие в значении $M_R(H_k, \delta_q^*, d_p)$ во время тестовой реализации при $N=11$ и $N=10$ не превысило 2%.

На рис. 2 проиллюстрирована билинейная сплайн-интерполяция $M_R(H, \delta^*, d)$ массива $M_R(H_k, \delta_q^*, d_p)$ при нескольких значениях величины d .

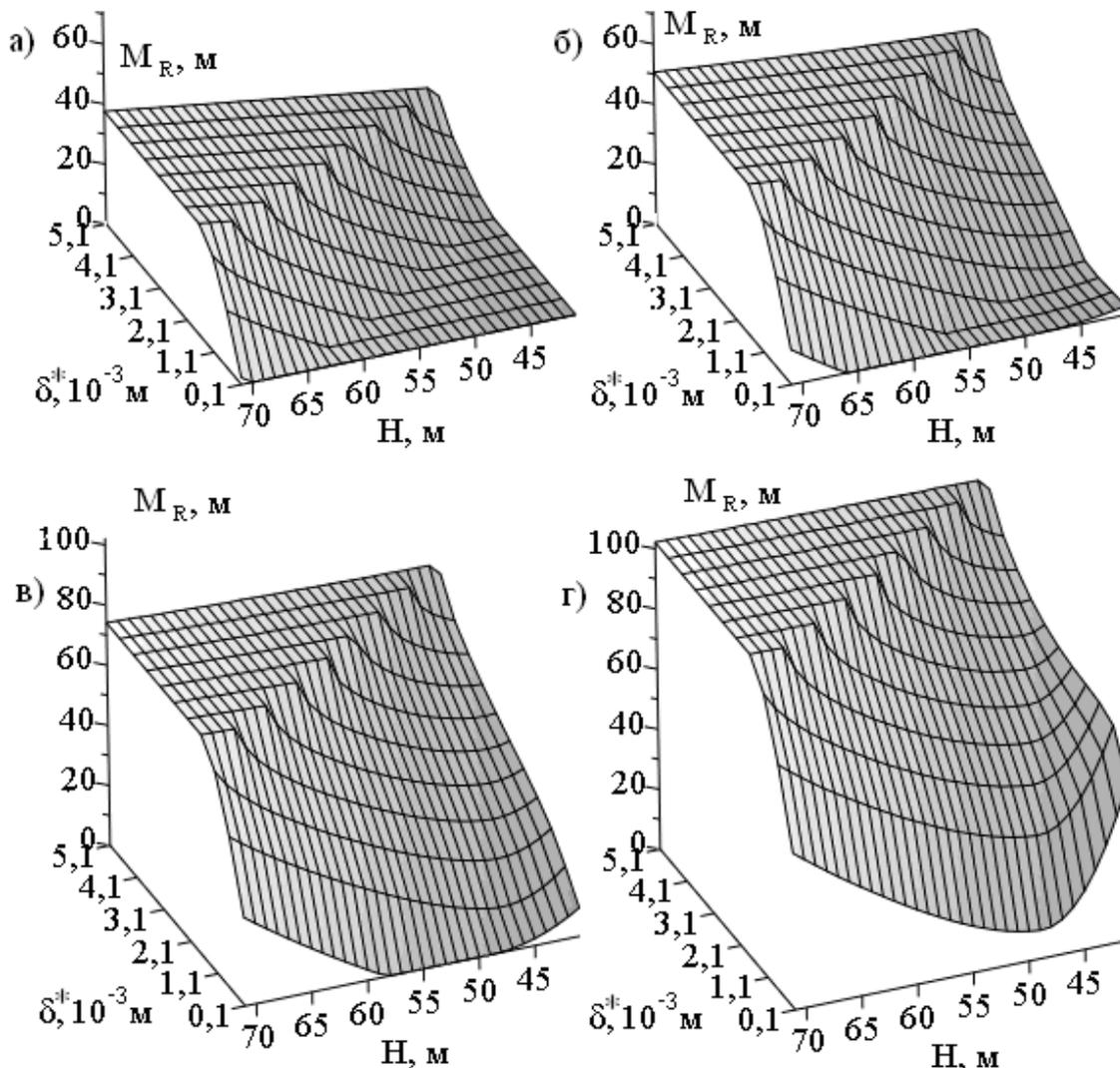


Рис. 2. Графики зависимостей $M_R(H, \delta^*)$: а) $d=10\text{м}$; б) $d=40\text{м}$; в) $d=70\text{м}$; г) $d=100\text{м}$

Из рисунка видно, что при малых расстояниях d между точками прицеливания средняя величина разрыва M_R равна 0 (за счет перекрытия водяных пятен). С увеличением толщины слоя δ^* также происходит рост M_R . При этом на больших высотах сброса происходит вырождение пятна в точку и среднее расстояние между пятнами сводится к среднему расстоянию между точками – центрами вырожденных пятен, которое, в свою очередь, стремиться к d .

Характерной особенностью является немонотонный характер изменения M_R с ростом высоты H , что особенно заметно при увеличении d . Этот факт объясняется немонотонным характером зависимости продольного габарита водяного пятна от высоты сброса [2].

Полученные данные для среднего значения величины M_R разрыва между водяными пятнами позволяют осуществить оптимизацию параметров сброса воды при прокладке локализационного барьера совместными усилиями наземных и авиационных сил пожаротушения с целью максимизации скорости данной прокладки.

Пусть имеется отрезок прямой локализационной линии длиной L ($L \gg a_1 + a_2$). Осуществляя сбросы воды вдоль него через расстояния d , пожарные самолеты должны произвести количество n сбросов, равное целой части дроби L/d , т.е.

$$n = \left[\frac{L}{d} \right]. \quad (9)$$

В силу случайного разброса водяных пятен, линия, соединяющая их центры, будет представлять собой ломаную, длина которой больше L .

Пусть средний временной интервал между сбросами воды равен t_c . Тогда на осуществления данного количества сбросов будет затрачено время

$$T_c = n t_c. \quad (10)$$

Наземные силы в это же время (т.е. параллельно со сбросами) осуществляют ликвидацию разрывов между водяными пятнами со скоростью V_g в течение времени

$$T_g = (n - 1) \frac{M_R}{V_g}. \quad (11)$$

Таким образом, на создание непрерывного ломаного барьера вдоль прямого отрезка длиной L потребуется среднее время

$$T_L = \max \left(n \cdot t_c, (n - 1) \cdot \frac{M_R}{V_g} \right). \quad (12)$$

При этом может оказаться, что время, которое затрачивают наземные силы на прохождение прямого отрезка L , равное L/V_g , будет меньше, чем время T_L и локализацию целесообразно осуществлять лишь наземными силами.

Поэтому искомое среднее время локализации пожара совместными усилиями наземных и авиационных сил на участке длиной L окончательно будет равно

$$T = \min \left(\frac{L}{V_g}, \max \left(\left[\frac{L}{d} \right] \cdot t_c, \left(\left[\frac{L}{d} \right] - 1 \right) \cdot \frac{M_R}{V_g} \right) \right). \quad (13)$$

Соответственно, средняя скорость локализации V_{loc} будет определяться выражением

$$V_{loc}(V_g, t_c, M_R(H, \delta^*, d), d) = \frac{L}{T}. \quad (14)$$

Подстановка элементов полученного ранее массива $M_R(H_k, \delta_q^*, d_p)$ в (13) позволяет при фиксированных значениях t_c и V_g найти дискретный массив $T_{kqp} = T(M_R(H_k, \delta_q^*, d_p))$. Соответственно, в дискретной постановке, методом прямого перебора [6] значений массива $T_{kqp} = T(H_k, \delta_q^*, d_p)$ возможно при каждом kq -ом значении пары (H_k, δ_q^*) выбрать $T_{kq}^m = \min \{ T_{kqp} \}_{p=1..P}$, т.е. минимальное время локализации отрезка прямой линии длиной L . Значение d_p , при котором осуществляется данная минимизация, будем помечать верхним индексом «m», и поскольку p будет принимать различные значения для каждой kq -ой пары, то будем обозначать данную дистанцию как d_{kq}^m . Та-

ким образом, получен массив $\left[d_{kq}^m \right]_{\substack{k=1..K \\ q=1..Q}}$ оптимальных значений дистанций d , обеспечивающий минимизацию времени локализации.

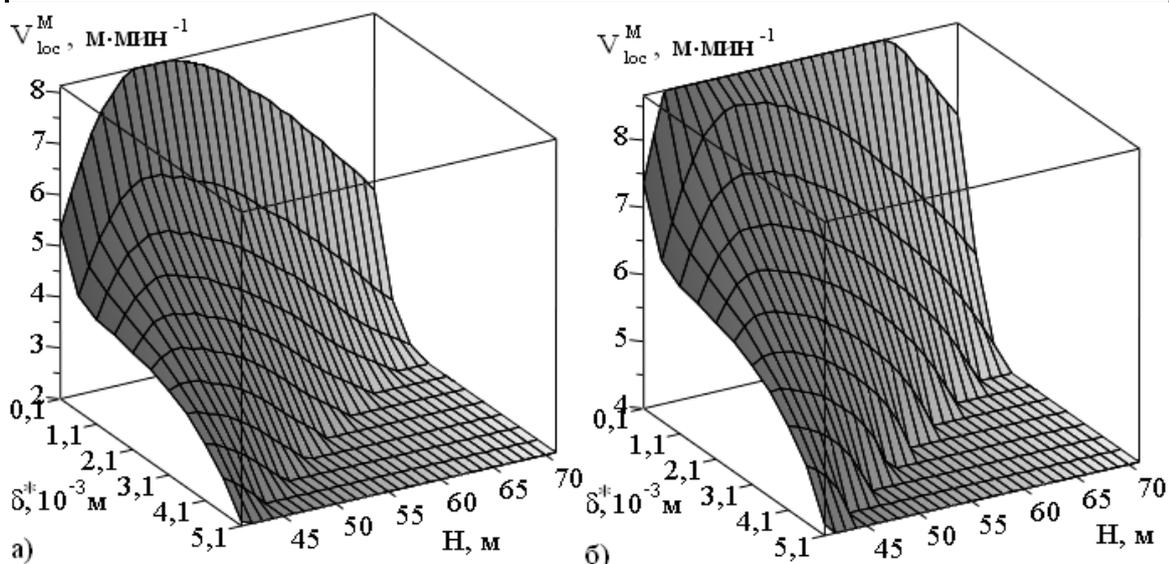
Подстановка T_{kq}^m вместо T в (14) позволяет решить задачу максимизации скорости (по параметру d) локализации для каждой kq -ой пары

$$V_{loc}(H_k, \delta_q^*, d_p) \xrightarrow{d_p} \max. \quad (15)$$

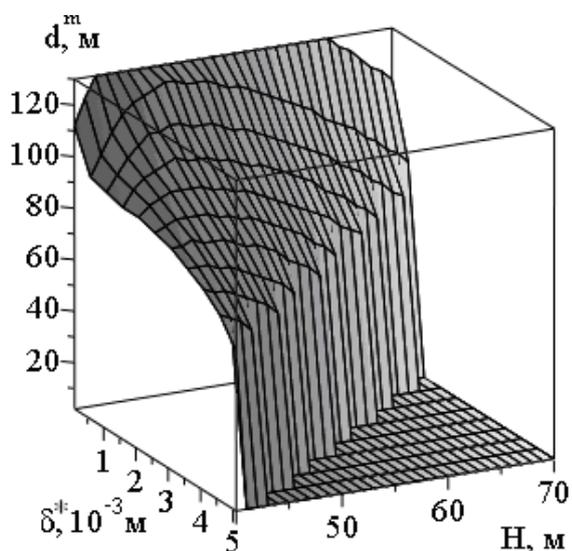
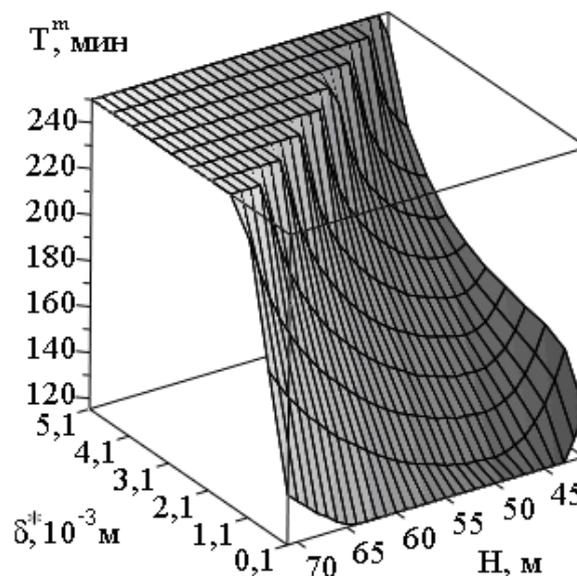
Решение задачи (15), найденное прямым перебором, будем обозначать как $V_{loc}^M(H_k, \delta_q^*)$ или $V_{loc\ kq}^M$.

На рис. 3 приведен пример графика $V_{loc}^M(H, \delta^*)$ билинейной сплайн-интерполяции $V_{loc}^M(H_k, \delta_q^*)$ при значениях $t_c = 15$ мин и при $V_g = 2$ м · мин⁻¹ (а); $V_g = 4$ м · мин⁻¹ (б).

Рис. 3 позволяет определить скорость локализации в зависимости от высоты сброса и необходимой толщины слоя воды. Видно, что максимальная скорость локализации имеет место при $\delta^* = 0.1$ мм.

Рис. 3. График функции $V_{loc}^M(H, \delta^*)$

При увеличении толщины слоя воды происходит снижение скорости (за счет уменьшения габаритов водяного пятна) до того уровня, когда продуктивность использования авиации снижается до нуля и использование авиации совместно с наземными силами становится не более продуктивным, нежели использование одних лишь наземных сил.

Рис. 4. График функции $d^m(H, \delta^*)$ Рис. 5. График функции $T^m(H, \delta^*)$

Полученный ранее массив $\left[d_{kq}^m \right]_{\substack{k=1..K \\ q=1..Q}}$ позволяет осуществить построение билинейной сплайн-аппроксимации, т.е. получение функции $d^m(H, \delta^*)$, график которой (при $t_c = 15$ мин и $V_g = 4$ м·мин⁻¹) представлен на рис. 4.

Сравнивая рис. 3-б и рис. 4 (т.к. они получены при одинаковых параметрах), можно заметить их сходство, что подтверждает достаточно очевидный факт – большая скорость локализации обеспечивается большим расстоянием между сбросами.

Локализация пожара на участке длиной L займет время $T^m(H, \delta^*)$. Пример графика данной зависимости показан на рис. 5 (при $L=1$ км, $t_c = 15$ мин и $V_g = 4$ м·мин⁻¹). Видно, что время, которое необходимо затратить при указанных значениях параметров, будет варьировать в интервале от 2-х до более чем 4-х часов.

Также, подставляя значения массива в $\left[d_{kq}^m \right]_{\substack{k=1..K \\ q=1..Q}}$ в (9), получим

массив оптимального количества сбросов $\left[n_{kq}^m \right]_{\substack{k=1..K \\ q=1..Q}}$ для проведения

локализации участка пожара длиной L . Следует отметить, что данная величина, в отличие от предыдущих, зависит от величины L .

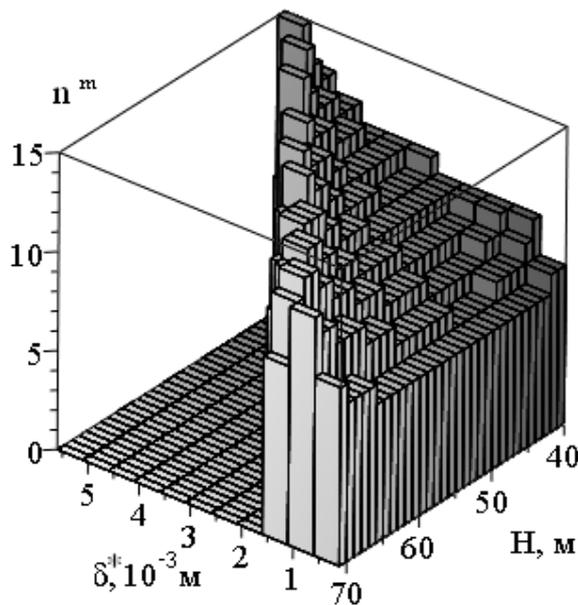


Рис. 6. График функции $n^m(H, \delta^*)$

На рис. 6 представлен график зависимости оптимального количества $n^m(H, \delta^*)$ сбросов (целочисленного параметра) от высоты сброса и требуемого слоя воды при локализации участка длиной $L=1$ км (при $t_c = 15$ мин и $V_g = 4$ м·мин⁻¹).

Видно, что в количество сбросов также существенно немонотонно и для данного примера варьирует в диапазоне от 7 до 15. Данный график позволяет определить необходимое количество сбросов, тем самым возможен расчет необходимого количества самолето-вылетов.

Сравнение рис. 4 и 6 показывает, что увеличение дистанции между

точками прицеливания приводит к снижению необходимого количества сбросов воды. Также видно, что, например, для создания переувлажненной полосы со слоем воды в 1 мм может понадобиться от 7 до 12 сбросов, в зависимости от того, с какой высоты эти сбросы осуществлять.

Выводы. На основе ранее полученных для самолета АН-32П моделей водяного пятна и прицельности сброса осуществлено построение модели скорости создания противопожарного барьера. Модель позволяет рассчитать время прокладки барьера в зависимости от производительности наземных сил пожаротушения и параметров сброса воды с самолета, а также необходимое количество самолето-вылетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Мелешенко Р.Г. Статистический анализ модели параметров сброса воды с пожарного самолета Ан-32П / Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян // Проблемы пожарной безопасности: Сб.научн.тр. – Вып. 35.-Х: НУГЗУ, 2013. – С.151-163.

3. Мелешенко Р.Г. Модель локализации природного пожара с помощью авиационной техники / Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян // Проблемы пожарной безопасности: Сб.научн.тр. – Вып. 34. – Х: НУГЗУ, 2013. – С.126-136.

4. Мелешенко Р.Г. Критерий принятия решения о целесообразности привлечения авиации для локализации лесного пожара / Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян // Проблемы пожарной безопасности: Сб.научн.тр. – Вып. 33. – Х: НУГЗУ, 2013. – С.122-132.

5. 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.

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

Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян

Моделювання швидкості створення протипожежного бар'єра при взаємодії наземних і авіаційних сил пожежогасіння

Запропонована імовірнісна модель швидкості створення безперервного протипожежного бар'єру – перезволоженої смуги, створюваної скидами води з літаків АН-32П спільно з наземними силами, які ліквідують розриви між водяними плямами.

Ключові слова: пожежний літак, протипожежний бар'єр, водяна пляма.

R.G. Meleshchenko, V.K. Muntian

Simulation of creation speed of the fire barrier in the interaction between land and air fire forces

We propose a probabilistic model of the rate of creation of a continuous fire barrier – waterlogged band created by the discharge of water from the AN-32P together with ground forces, which eliminate gaps between water spots.

Keywords: fire plane, fire barrier, water spot.