

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

КРИТЕРИЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИВЛЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

Обоснован необходимый критерий принятия решения руководителем тушения лесного пожара о привлечении к локализации авиационной техники. Оценена средняя скорость локализации пожара в зависимости от ряда детерминированных и случайных факторов. Предложены параметры сброса воды для самолета Ан-32П, обеспечивающие максимизацию средней скорости локализации.

Ключевые слова: пожарная авиация, скорость локализации, критерий принятия решения.

Постановка проблемы. Высокая интенсивность тепловыделения кромки лесного пожара и высокая скорость распространения фронта приводят к необходимости доставки большого количества воды к очагу для его тушения. Невозможность оперативного решения данной задачи наземными способами в горной либо труднодоступной местности позволяет рассматривать сбросы воды, доставляемые пожарными самолетами (ПС), как едва ли ни единственный способ борьбы с пожарами. Вместе с тем, использование пожарной авиации требует значительных материальных затрат. В этой связи возникает вопрос о целесообразности ее применения, поскольку опыт практической борьбы свидетельствует о низкой эффективности данного метода.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1-2] проводится оценка необходимого расхода воды при авиационном тушении кромки лесного пожара, показана низкая эффективность данного метода. В тоже время отсутствуют работы, обосновывающие целесообразность использования пожарной авиации при локализации лесного пожара путем создания переувлажненной заградительной полосы перед фронтом пожара.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является обоснование критерия принятия решения руководителем тушения (РТП) лесного пожара о целесообразности привлечении авиации для его локализации.

Борьба с лесными пожарами авиационными методами может осуществляться в виде непосредственного тушения кромки пожара (прямая атака) и в виде локализации – создания переувлажненной заградительной полосы вокруг области пожара (непрямая атака). Не-

прямая атака требует меньших затрат, но приводит к увеличению площади пожара в сравнении с прямой [3] и больших потерь растительного горючего материала (РГМ).

В работе [4] показано, что успешное тушение динамической кромки пожара возможно лишь в том случае, если нормальная скорость продвижения кромки пожара V_{Π} ниже скорости тушения V_T .

Скорость распространения кромки лесного пожара (в т.ч. верхового) в зависимости от ландшафтно-метеорологических условий может быть оценена на основании модели [5], а прогноз динамики периметра пожара может быть получен на основании [4]. Следует отметить, что контур пожара чаще всего имеет сложную невыпуклую форму. Полученный прогноз динамики периметра позволяет получить аналогичный прогноз минимальной выпуклой оболочки [6], натянутой на контур (рис. 1).

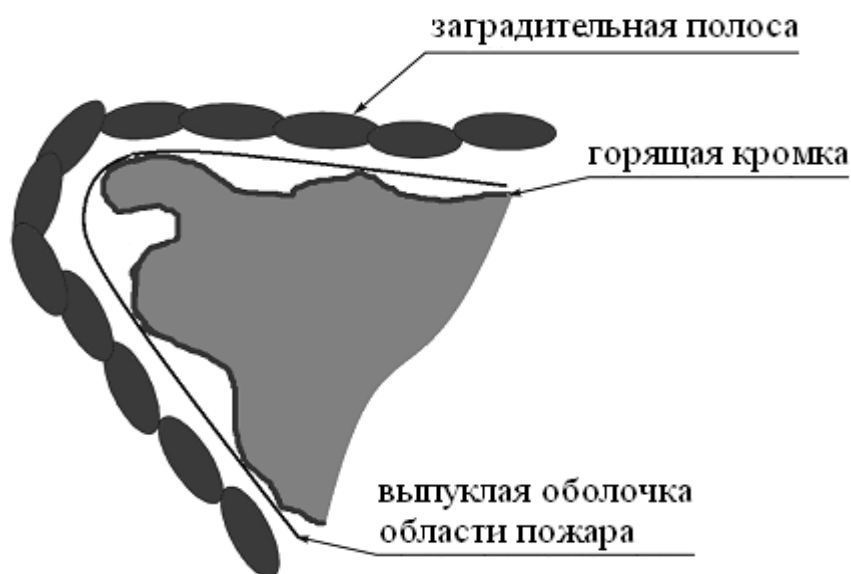


Рис. 1 – Схема построения заградительной полосы перед фронтом лесного пожара

Осуществление локализации лесного пожара с помощью авиации целесообразно лишь в случае выполнения неравенства

$$V_{\text{НЛ}} < V_{\text{ОП}} < V_{\text{Л}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ОП}}$ - нормальная скорость распространения выпуклой оболочки области пожара ($V_{\text{ОП}} \geq V_{\Pi}$); $V_{\text{Л}}$ - скорость ее локализации авиационными методами; $V_{\text{НЛ}}$ - скорость локализации наземными методами.

Условие (1) может быть интерпретировано как необходимый критерий целесообразности использования авиатехники при тушении пожара (в виду невозможности использования наземных методов), который позволяет РТП принимать решение о запросе или отказе в запросе использования авиации. Необходимость критерия означает, что его невыполнение однозначно указывает на отказ, при этом крите-

рий (1) не является достаточным, поскольку не учитывает экономическую составляющую, и выполнение его не означает автоматического принятия решения о запросе пожарной авиации.

Скорость локализации V_L в значительной мере варьирует, поскольку зависит от ряда детерминированных и случайных факторов - расстояния от водозабора до очага, тактико-технических характеристик (ТТХ) ПС (скорости полета, времени заправки и объема доставляемой воды), прицельности сброса и пространственного распределения воды внутри водяного пятна (зависят от высоты сброса), необходимой ширины противопожарной полосы (зависит от интенсивности тепловыделения пожара). В виду стохастического характера величины V_L , целесообразно говорить о ее среднем значении.

В виду многофакторности, экспериментальное определение средней величины V_L требует очень больших материальных затрат.

Проведем теоретическую оценку усредненной величины V_L , сделав допущение о постоянстве вышеупомянутых факторов для конкретного пожара. Кроме того, рассмотрим случай распространения пожара в зоне, где отсутствуют естественные противопожарные барьеры и негорючие участки, включение которых в тактическую схему борьбы с пожаром позволяет существенно ускорить его локализацию (т.е. рассмотрим «наихудший» из возможных сценариев развития пожара).

Зададим значение нормативной толщины слоя воды на уровне z^* (обеспечивающей системе РГМ-вода влагосодержание выше критического [7]), что позволяет найти границу $L(x; y) = 0$ области $Z(x; y) = z^*$. Данная граница будет представлять собой компиляцию двух полуэллипсов (биэллипс) [8], имеющих общий центр в начале локальной системы координат, т.е. $(x_{01}; y_{01}) = (0; 0)$. Удобно записать уравнение $L(x; y) = 0$ в параметрическом виде в декартовой системе координат XOY , связанной с центром биэллипса, в виде

$$L(\varphi) = \begin{cases} X_L(\varphi); \\ Y_L(\varphi); \end{cases} \quad \varphi \in [0; 2\pi], \quad (2)$$

(где φ - полярный угол), получаемого из полярного уравнения эллипса $\rho(\varphi) = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}}$ с полуосями a и b . При этом

$$X_L(\varphi) = \begin{cases} ab \cdot \cos \varphi / \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}, & 0 \leq \varphi < \pi/2; \\ cb \cdot \cos \varphi / \sqrt{c^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}, & \pi/2 \leq \varphi < 3\pi/2; \\ ab \cdot \cos \varphi / \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}, & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi; \end{cases} \quad (3)$$

$$Y_L(\varphi) = \begin{cases} ab \cdot \sin \varphi / \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}, & 0 \leq \varphi < \pi/2; \\ cb \cdot \sin \varphi / \sqrt{c^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}, & \pi/2 \leq \varphi < 3\pi/2; \\ ab \cdot \sin \varphi / \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}, & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi. \end{cases} \quad (4)$$

Расположение полуосей биэллипса показано на рис. 2.

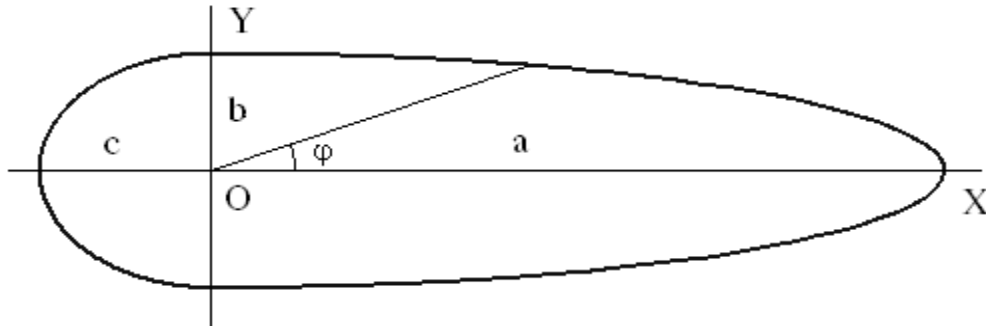


Рис. 2 – Контур $L(x; y) = 0$ в виде биэллипса

Известные параметры пространственного распределения центра сброса [8, 9] позволяют решить вероятностную задачу о перекрытии одного сброса другим, что обеспечивает неразрывность цепочки сброса воды и создания непрерывного противопожарного заслона из перувлажненного растительного горючего материала.

Перекрытие двух водяных пятен будет иметь место, если центр $(x_{02}; y_{02})$ второго водяного пятна попадет в окрестность первого – область Ω (рис. 3). Найдем границу $\bar{\Omega}(\varphi)$ области Ω из условия касания двух контуров L_1 и L_2 . Решение будем искать в параметрическом виде

$$\bar{\Omega}(\varphi) = \begin{cases} X_{\bar{\Omega}}(\varphi); \\ Y_{\bar{\Omega}}(\varphi); \end{cases} \quad \varphi \in [0; 2\pi]. \quad (5)$$

Зададим параметрически контур $L_2(\psi)$ второго водяного пятна в подвижной локальной системе координат $X'O'Y'$ в виде (2)-(4), но с параметром ψ – полярным углом в данной локальной системе.

Поскольку центр системы координат $X'O'Y'$ расположен на искомой линии $\bar{\Omega}(\varphi)$, то в системе XOY имеют место соотношения

$$\begin{aligned} X_{\bar{\Omega}}(\varphi) + X_{L_2}(\psi) &= X_{L_1}(\varphi); \\ Y_{\bar{\Omega}}(\varphi) + Y_{L_2}(\psi) &= Y_{L_1}(\varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

откуда, с учетом (2), получаем

$$\bar{\Omega}(\varphi) = \begin{cases} X_{L_1}(\varphi) - X_{L_2}(\psi); \\ Y_{L_1}(\varphi) - Y_{L_2}(\psi), \end{cases} \quad \varphi \in [0; 2\pi]. \quad (7)$$

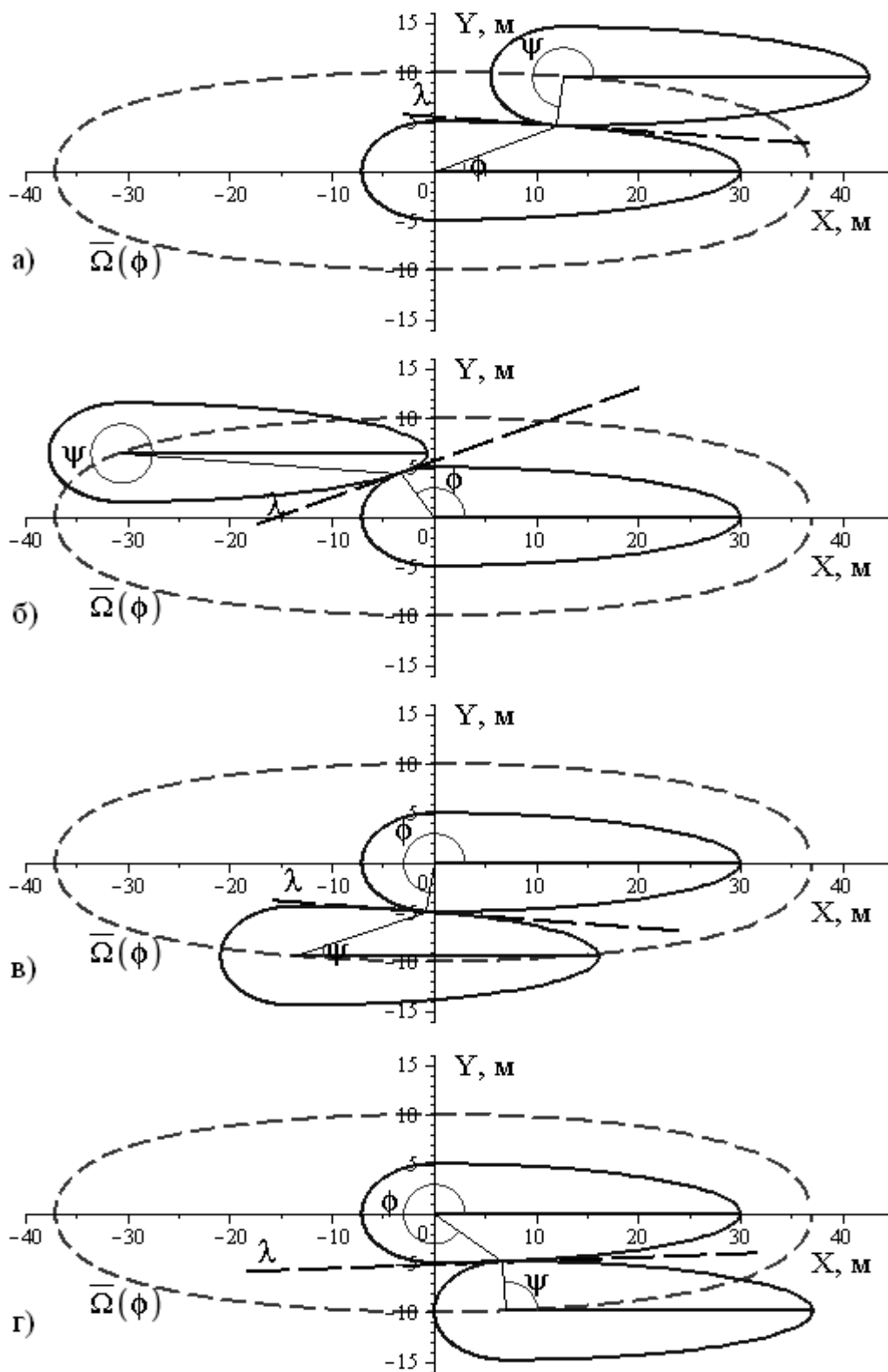


Рис. 3 – Иллюстрация процедуры нахождения зависимости $\bar{\Omega}(\varphi)$ для:
 а) $0 \leq \varphi < \pi/2$; б) $\pi/2 \leq \varphi < \pi$; в) $\pi \leq \varphi < 3\pi/2$; г) $3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi$

Полярные углы φ и ψ заданы в разных системах координат. Зависимость $\psi = f(\varphi)$ между углами установим из того факта, что в точке касания оба биэллипса имеют общую касательную λ , угол наклона которой в системе XOY обозначим α . В системе $X'O'Y'$ угол наклона касательной обозначим β . Данные углы различаются на величину π .

Производная параметрически заданного контура $L_1(\varphi)$ может быть найдена из (3) и (4)

$$\frac{dY_L(\varphi)}{dX_L(\varphi)} = \operatorname{tg}\alpha = \begin{cases} -b^2/a^2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi, & 0 \leq \varphi < \pi/2; \\ -b^2/c^2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi, & \pi/2 \leq \varphi < 3\pi/2; \\ -b^2/a^2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi, & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi. \end{cases} \quad (8)$$

В силу кусочного характера задания функции (8), необходимо различать отдельные случаи:

– при $0 \leq \varphi < \pi/2$ имеем $\pi \leq \psi < 3\pi/2$ (см. рис. 3-а)

$$\pi/2 \leq \alpha < \pi. \quad (9)$$

Тогда

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(-b^2/a^2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi\right) + \pi \cdot k, \quad (10)$$

где k – целое число, которое должно быть таким, чтобы удовлетворялось условие (9).

Для угла β наклона касательной к контуру $L_2(\varphi)$ имеет место условие

$$3\pi/2 \leq \beta < 2\pi, \quad (11)$$

при этом (см. рис. 3)

$$\beta = \alpha + \pi, \quad \pi \leq \psi < 3\pi/2. \quad (12)$$

Тогда

$$\operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}\left(\operatorname{arctg}\left(-b^2/a^2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi\right) + \pi(k+1)\right) = -b^2/a^2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi. \quad (13)$$

В силу (8), (11), (12) и (13) получаем уравнение

$$-b^2/a^2 \operatorname{ctg}\varphi = -b^2/c^2 \operatorname{ctg}\psi, \quad (14)$$

решая которое относительно ψ , получаем

$$\psi = \operatorname{arcctg}\left(c^2/a^2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi\right) + \pi \cdot k, \quad (15)$$

где k – целое число, которое должно быть таким, чтобы удовлетворялось условие (12). Имеем для (15) $k = 1$.

Проводя аналогичные построения для случаев $\pi/2 \leq \varphi < \pi$; $\pi \leq \varphi < 3\pi/2$; $3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi$ (рис. 3-б - 3-г), получаем кусочное выражение для зависимости $\psi(\varphi)$

$$\psi(\varphi) = \begin{cases} \pi + \operatorname{arccctg}(c^2/a^2), & 0 \leq \varphi < \pi/2; \\ \pi + \operatorname{arccctg}(a^2/c^2), & \pi/2 \leq \varphi < \pi; \\ \operatorname{arccctg}(a^2/c^2), & \pi \leq \varphi < 3\pi/2; \\ \operatorname{arccctg}(c^2/a^2), & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi. \end{cases} \quad (16)$$

Подстановка (16) в (7) решает задачу нахождения границы $\bar{\Omega}(\varphi)$ области размещения центра второго пятна, обеспечивающего непрерывность цепочки сброса воды. Отметим, что данная линия уже не является эллипсом.

Будем полагать, что необходимо осуществлять сбросы вдоль намеченной линии, при этом первое водяное пятно уже сброшено и ориентировано вдоль нее. В упрощенной постановке данная линия (обозначим ее d) может быть прямой, совпадающей с осью OX .

Второй сброс, в случае, если центр его $(x_{02}; y_{02})$ будет принадлежать области Ω , может продлить водяной след, покрывающий линию d , на величину приращения $\Delta\ell$ (рис. 4). Найдем зависимость $\Delta\ell$ от координат $(x_{02}; y_{02})$.

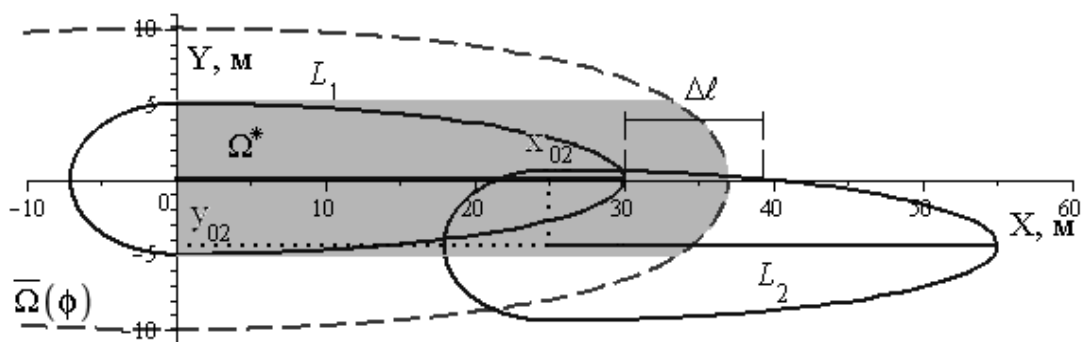


Рис. 4 – Нахождение приращения противопожарного заслона $\Delta\ell$

Будем полагать, что целью сбросов воды является создание непрерывного противопожарного заслона в положительном направлении оси OX .

Из канонического уравнения эллипса

$$\frac{(x - x_{02})^2}{a^2} + \frac{(y - y_{02})^2}{b^2} = 1, \quad (17)$$

описывающего $L_2(\varphi)$ при $\varphi \in [0; \pi/2] \cup [3\pi/2; 2\pi]$, получаем

$$\Delta\ell(x_{02}; y_{02}) = \begin{cases} x_{02} + \frac{a}{b} \left(\sqrt{b^2 - y_{02}^2} - b \right), & -b < y_{02} < b; \\ 0, & y_{02} < -b, y_{02} \geq b; \end{cases} \quad (x_{02}; y_{02}) \in \Omega. \quad (18)$$

Зная параметры $P_{x_{02}, y_{02}}(x; y)$ распределения двумерной случайной величины – координат центра биэллипса [8], можно найти математическое ожидание $M[\Delta\ell]$ приращения длины $\Delta\ell$ противопожарного заслона

$$M[\Delta\ell](x; y) = \iint_{\Omega^*} P_{x_{02}, y_{02}}(x; y) \cdot \Delta\ell(x; y) dx dy, \quad (19)$$

где область $\Omega^* = \{(x; y) | (x; y) \in \Omega, x \geq 0, y \geq -b, y \leq b\}$ (см. рис. 4).

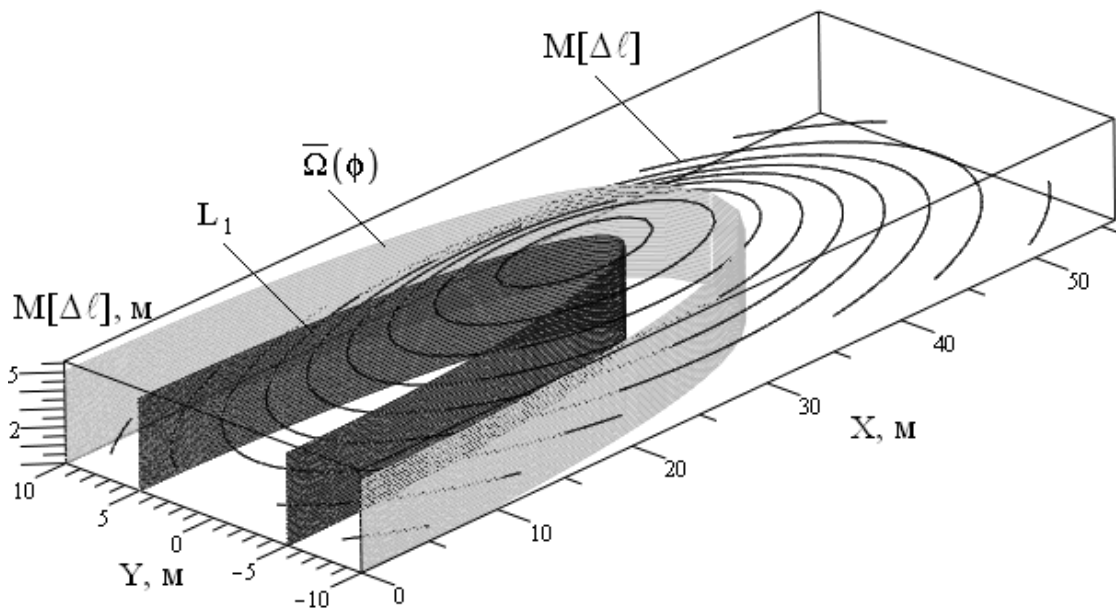


Рис. 5 – График $M[\Delta\ell](x; y)$ для данных [8], высоты сброса 40 м, $z^* = 5\text{мм}$

График $M[\Delta\ell](x; y)$ для распределения, параметры которого приведены в [8], [9] приведен на рис. 5 (вычисление интеграла (19) осуществлялось численно на множестве узлов квадратной решетки).

Из рисунка видно, что максимальное приращение длины противопожарной полосы при одном сбросе не превышает 6 м, что в целом может характеризовать тактические возможности пожарного самолета Ан-32П как очень низкие.

Приведенные графики демонстрируют симметрию относительно

плоскости $Y = 0$ и наличие четко выраженного максимума, расположенного на линии d (оси OX), в связи с чем, для отыскания координат точки прицеливания, обеспечивающей максимум математического ожидания приращения $M[\Delta\ell](x; y)$, требуется решать одномерную задачу, а именно - сброс №2 необходимо осуществлять в точку прицеливания, координаты которой $(x_{02}; 0)$ могут быть найдены в виде решения оптимизационной задачи

$$M[\Delta\ell](x_{02}; 0) \xrightarrow{(x_{02}; 0) \in \Omega^*} \max. \quad (20)$$

В силу зависимости $M[\Delta\ell]$ от z^* и высоты сброса H , планируется дальнейшее решение данной задачи в виде нахождения уравнения регрессионной поверхности.

Введем параметр $T_i = t_{i+1} - t_i$ - интервал времени между i и $i + 1$ сбросами. Продолжительность T_i в общем случае может отличаться от сброса к сбросу. Отношение

$$V_{\text{ли}} = \frac{\max M[\Delta\ell]}{T_i} \quad (21)$$

определяет максимально возможную среднюю скорость тушения кромки пожара для i -ого сброса.

Выражение (21) совместно с (1) позволяет оценить максимально возможное время между сбросами; соответственно, может быть определено необходимое минимальное количество пожарных самолетов, обеспечивающее успешность локализации.

Выводы. Для параметров пожарного самолета Ан-32П теоретически получены оценки средней скорости создания им противопожарной полосы при локализации лесного пожара, что позволяет РТП принимать решение о целесообразности привлечения авиации для борьбы с пожаром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдурагимов И.М. Проблема тушения крупных лесных пожаров и крупномасштабных пожаров твердых горючих материалов в зданиях // Пожаровзрывобезопасность – 2012. - т. 21, №2. - С. 69-74.
2. Абдурагимов И.М. Проблема тушения лесных и торфяных пожаров (тепловая теория тушения пожаров твердых горючих материалов на открытых пространствах и внутри зданий и сооружений) // Пожаровзрывобезопасность – 2012. - т. 21, №10. - С. 66-76.
3. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. - М.: Гослесбумиздат, 1962. - 154 с.

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

5. Rothermel R.C. A mathematical Model for fire Spread Predictions in Wildland Fuels // Ogden: USDA Forest Service Res. Paper. - 1972. – INT – H5. – 40 p.

6. Андреева Е.В. Вычислительная геометрия на плоскости / Е.В. Андреева, Ю.Е. Егоров // Информатика. – 2002. - №40. – С. 28-31.

7. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 239 с.

8. Мунтян В.К. Формирование водяного пятна при сбросе воды с пожарного самолета Ан-32П/ В.К. Мунтян, И.С. Агапова, Р.Г. Мелещенко // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. - № 26 – С. 80-81.

9. Кириченко И.К. Моделирование параметров сброса воды с пожарного самолета Ан-32П на основании данных полученных «sur-and-grid» методом/ И.К. Кириченко, В.К. Мунтян, Р.Г. Мелещенко // Проблемы пожарной безопасности. – 2010. - № 28 – С. 86-92.

nuczu.edu.ua

Р.Г. Мелещенко, В.К. Мунтян

Критерій прийняття рішення про доцільність залучення авіації для локалізації лісової пожежі

Обґрунтовано потрібний критерій прийняття рішення керівником гасіння лісової пожежі про притягнення до локалізації авіаційної техніки. Оцінена середня швидкість локалізації пожежі в залежності від ряду детермінованих і випадкових факторів. Запропоновані параметри скидання води для літака Ан-32П, що забезпечують максимізацію середньої швидкості локалізації.

Ключові слова: пожежна авіація, швидкість локалізації, критерій прийняття рішення.

R.G. Meleschenko, V.K. Mountyan

The criterion of the decision on the expediency of aviation for the localization of a forest fire

Justified essential criterion for acceptance of the decisions of the head of the carcass of a forest fire on bringing to the localization of aviation equipment. Estimated average speed of localization of fire, depending on the number of determined and random factors. Proposed parameters of the discharge of water for airplane An-32P, to ensure the maximization of the value of the average soon-of localization.

Keywords: fire aviation, the speed of localization, decision making criterion.