

УДК 614.841.42

DOI 10.17223/19988621/59/8

**Н.П. Копылов, В.Н. Карпов, А.Е. Кузнецов,
Д.В. Федоткин, И.Р. Хасанов, Е.Ю. Сушкина**

ОСОБЕННОСТИ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВИАЦИИ

Систематизированы данные по плотности орошения водой леса для создания заградительных полос и тушения очагов горения. Приведены характеристики зон орошения при сбросе воды с самолетов легкого класса GL-215, среднего – БЕ-200 и тяжелого – ИЛ-76. Выполнена оценка влияния высоты сброса огнетушащего вещества на плотность орошения и приведены формулы для расчета эффективной высоты сброса, карты орошения и массовой концентрации огнетушащего вещества на земле. Приведены результаты стендовых огневых экспериментов по оценке эффективности добавок к воде при тушении верхового и низового пожаров.

Ключевые слова: *лесной пожар, авиационное пожаротушение, плотность орошения, дисперсность огнетушащего вещества, расчет высоты сброса и карт орошения, добавки к воде.*

Применение авиации при определённых условиях может существенно повысить эффективность борьбы с лесными пожарами на всех стадиях ликвидации [1]:

- при сдерживании (локализации) пожара;
- дотушивании (ликвидации очагов горения на локализованной площади);
- окарауливании (наблюдении за пожарищем для предотвращения возобновления пожара от обнаруженных очагов горения и переноса горящих частиц на негоревшую территорию).

Для каждого вида перечисленных операций необходимо обеспечить расходные характеристики сбрасываемых авиацией огнетушащих веществ.

В [2] приведены обобщенные данные по требуемым удельным расходам воды при прокладке опорных и заградительных полос (локализации пожара) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Требуемый расход воды при прокладке опорных и заградительных полос

Лесорастительные условия	Удельный расход воды, л·м ⁻²
Лесорастительные участки с полнотой хвойных насаждений менее 0.2	0.7
Хвойные насаждения с полнотой от 0.2 до 0.3 со слабовыраженным напочвенным покровом и подстилкой 2–3 см	1.3
Хвойные насаждения с полнотой от 0.4 до 0.5 со слабовыраженным напочвенным покровом и подстилкой 3–5 см	2.0
Высокополнотные хвойные насаждения с мощным слоем подстилки, а также участки повышенной пожарной опасности (хвойные молодняки, захламлинные вырубки, гари и т.п.	2.6

В США [3] приняты также четыре уровня средней величины дозировки покрытия поверхности лесных массивов огнетушащей жидкостью при тушении лесных пожаров. Диапазон дозировки от 0.5 до 1.75 л·м⁻² в зависимости от плотности леса, скорости ветра и других параметров. Тушение предполагает слив огнетушащего вещества на очаг горения (горящую кромку леса). В [4] отмечается, что для тушения степных и низовых лесных пожаров в среднем необходимо обеспечить плотность орошения водой 5–7 л·м⁻², а для пожаров с более интенсивным горением свыше 10 л·м⁻², при этом необходимая плотность определяется тепловым балансом пожара, связанным со свойствами и запасом горючих веществ, и зависит от характеристик огнетушащего вещества.

Для оценки возможностей авиационного способа борьбы с лесными пожарами экспериментально определяется карта орошения земной поверхности при сбросе воды с самолета. Величина площади орошения зависит от ёмкости баков, высоты сброса, скорости самолета, метеорологических условий. В [2–4] приведены карты орошения для зарубежных и отечественных самолетов (табл. 2).

Таблица 2

Карты орошения для самолетов GL-215 «Canadair», БЕ-200, ИЛ-76

Тип самолета и характеристика сброса воды						
GL-215 $V_{\text{воды}} = 5455 \text{ л};$ $H_{\text{сб}} = 20\text{--}30 \text{ м};$ $v_{\text{полета}} = 180\text{--}200 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$		БЕ-200 $V_{\text{воды}} = 12000 \text{ л}; H_{\text{сб}} = 30\text{--}50 \text{ м};$ $v_{\text{полета}} = 260 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$			ИЛ-76 $V_{\text{воды}} = 42000 \text{ л};$ $H_{\text{сб}} = 60 \text{ м};$ $v_{\text{полета}} = 280 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$	
Пороговая плотность орошения, л·м ⁻²	Длина × ширина полосы, м	Пороговая плотность орошения, л·м ⁻²	Длина × ширина полосы, м	Средняя плотность орошения л·м ⁻²	Средняя/максимальная плотность орошения, л·м ⁻²	Длина × ширина полосы, м
0.5	90×35	0.1	133–500 × 50–88	0.34–0.95	0.8/2.7	600–800 × 60–80
1.0	64×29	0.8	20–320 × 20–44	0.98–2.21		
1.75	52×26	3.5	10–40 × 4–16	3.01–5.22		

Все эти данные получены в «холодных» экспериментах, то есть без учёта воздействия горящего леса.

Приведенные значения показывают, что карты орошения со значениями плотности воды, во-первых, имеют небольшие размеры по смачиваемой площади и, во-вторых, полученные плотности, в лучшем случае, обеспечивают локализацию пожара в соответствии с данными табл. 1. Плотность орошения в значительной степени зависит, как отмечалось выше, от высоты полёта, которая в свою очередь при тушении реальных пожаров влияет на дисперсность капель воды.

Высота сброса огнетушащего вещества определяется безопасностью полёта над зоной пожара. В реальных условиях лесной пожар вносит существенные изменения в состояние атмосферы. В [5] с помощью аналитических и математических моделей, которые основаны на уравнении Навье – Стокса, численно исследованы параметры конвективных движений над крупными пожарами. Установлено, что для линейного пожара с мощностью тепловыделения 5·10⁶ кВт·м⁻¹ и шириной фронта 80 м вертикальный Z и горизонтальный D размеры зон возмущений,

реализующихся в конвективной колонке, составили $Z = 1.5$ км, $D = 0.5$ км. Анализ характеристик возмущений атмосферы при крупных пожарах показал, что взаимодействие индуцированных пожаром воздушных потоков с ветром может привести к проявлению знакопеременных нагрузок в горизонтальной плоскости. Наличие вихревой структуры в конвективной колонке над пожаром приводит к появлению знакопеременной вертикальной перегрузки. При подлете к кромке колонки из-за нисходящих движений воздуха на ее периферии эта перегрузка будет направлена вниз, при пролете центра колонки она максимальна и направлена вверх, при выходе из колонки снова вниз. При полете на малых высотах в условиях ограниченной из-за задымления видимости фактор знакопеременных возмущений имеет важное значение с точки зрения обеспечения безопасности полетов. Таким образом, по соображениям безопасности требуется увеличить высоту полета.

В [6] получены зависимости плотности орошения от высоты полета самолета. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер. В этой работе на основании обработки экспериментальных данных для самолетов GL-215 и БЕ-200 получено соотношение для расчета эффективной высоты сброса жидкости

$$H_0 = A(\lambda) \cdot \frac{\sqrt{\sigma} \cdot \lambda}{g \cdot Fr^2} \quad (1),$$

где $A(\lambda)$ – коэффициент, зависящий от вида добавки к воде (замедлителя горения); $\lambda = l^2 / \sigma$ – удлинение поперечного сечения сливного люка; l – длина водяного бака, м; σ – площадь сливного люка бака самолета, м²; g – ускорение свободного падения, м²·с⁻¹.

На рис. 1 приведена зависимость плотности орошения q в зависимости от высоты полета H_0 . Fire Trol 100 – раствор воды с добавкой сульфата аммония, аттипульгитной глины (загуститель) окиси железа. Плотность раствора $1.12 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, вязкость раствора 1.5–2 Па·с.

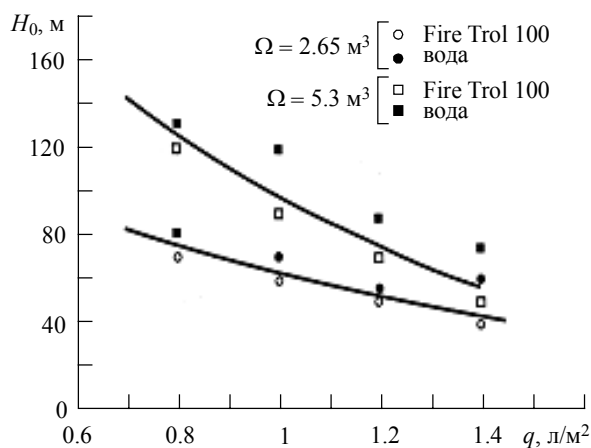


Рис. 1. Зависимость эффективной высоты H_0 сброса от плотности орошения q для Fire Trol 100 и воды (по данным работы [6])

Fig. 1. Dependency diagram of the optimum altitude of discharge H_0 on the irrigation density q for Fire Trol 100 and water (according to the data from [6])

Для самолета ИЛ-76 зависимости плотности орошения от высоты полета приведены на рис. 2. [2].

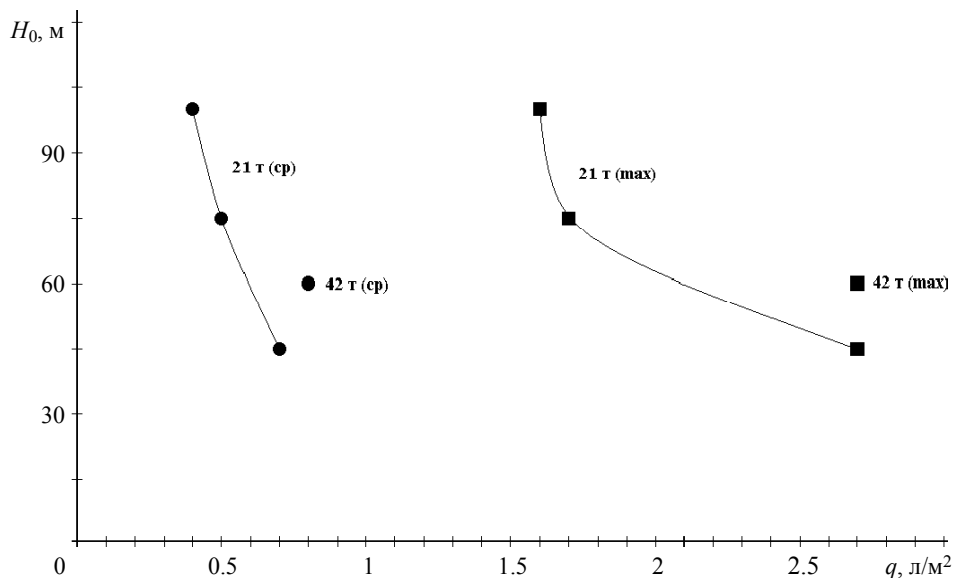


Рис. 2. Зависимость плотности орошения, от высоты полета самолета ИЛ-76 (● – средние значения плотности орошения, ■ – максимальные значения плотности орошения)
Fig. 2. Dependency diagram of the irrigation density on the flight altitude of IL-76 aircraft (● – the average values of the irrigation density, ■ – the maximum values of the irrigation density)

Единственным источником, в котором описаны результаты измерения у поверхности земли каплей воды при сбросе с самолета ИЛ-76, является работа [7]. Эксперименты показали, что спектр капель воды, сброшенной с самолета ИЛ-76, близок к спектру дождевых капель. Образовавшиеся капли воды в зависимости от размера частично уносятся воздушными потоками в атмосфере, частично испаряются или теряют свою массу в факеле пламени. Такие потери по данным [8] могут доходить до 50 %. Это приводит к изменению реальной площади и плотности орошения (к их уменьшению). Краткий обзор работ по испарению капель воды приведен в [9]. В [10] выполнен расчет испарения капель воды. В [2] представлена математическая модель для расчета плотности и карты орошения. В этой модели учитывается высота сброса, скорость самолета, скорости и направление ветра, турбулентная диффузия, дисперсность капель. Геометрические границы области распределения дисперсной фазы жидкости в вертикальной $0 < Y < Y_0$ и горизонтальной $Y = 0$ плоскостях описываются соотношениями

$$Y(X, t, d) = \sup \{ \inf [Y_0; Y_0 - W(d)(t - X/V_n)]; 0 \}; \quad (2)$$

$$Z(X, t, d) = \inf \{ \sup [0; V_b \sin(\alpha)(t - X/V_n); V_b \sin(\alpha)Y_0 / W(d)] \}, \quad (3)$$

где X, Y, Z – координаты; Y_0 – высота полета; t – время; d – диаметр капель; $W(d)$ – скорость оседания капли диаметром d ; V_n – скорость самолета; V_b – скорость ветра; α – угол между направлением ветра и направлением полета.

Для расчета массовой наземной концентрации получена формула:

$$C(X, Y=0, Z, t > Y_0 / W(d), d) = \int_0^{t_1} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{q \cdot F(d) \cdot W(d)}{W'(d) \cdot Y_0 \cdot V_b \cdot \sin(\alpha)} dt dd, \quad (4)$$

где $q = G/V_n$ – погонный расход жидкости; G – секундный расход жидкости; $F(d)$ – плотность вероятности распределения капель по размерам; t_1 – время оседания капель жидкости.

$$W(d) = \frac{12,4}{1 + 1,7/d + (0,55/d)^2}; \quad (5)$$

$$F(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_e d} \exp\left(-\frac{(\ln(d/d_m))^2}{2\sigma_e^2}\right), \quad (6)$$

где d_m – медиана распределения; σ_e – дисперсия логарифма диаметра частиц d .

Для повышения эффективности воды, сбрасываемой с самолета, в нее вводятся добавки в виде смачивателей, ингибиторов горения, загустителей. На эту тему выполнено большое количество работ, например [8]. В этих работах определены параметры зон орошения огнетушащими веществами с добавками. В частности, добавки загустителей могут увеличить линейные геометрические размеры зон орошения в 4 раза. Вместе с тем количественно не оценивалась эффективность добавок к воде в огневых экспериментах при сбросе огнетушащего вещества с самолета.

В [11, 12] оценена эффективность добавок к воде при тушении очагов горения, моделирующих низовой и верховой пожары. В табл. 3 приведены результаты экспериментов по тушению низового и верхового пожаров. Эксперименты проводились на специально созданном стенде, моделирующем дисперсный состав сбрасываемой с самолета огнетушащей жидкости.

Таблица 3

Результаты огневых экспериментов по определению эффективности тушения очагов, имитирующих лесной пожар водой и различными растворами

Огнетушащее вещество	Кинематическая вязкость $\times 10^{-6}$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Время разгорания, с	Время тушения очагов, с	Очаг, имитирующий вид лесного пожара
Вода	1	383	39/52/57/62/80	Верховой
Вода	1	380	30 (время тушения последнего очага)	Низовой
Раствор бишофита, 8 %-й	1.45		14/57/63/70/92	Верховой
Раствор бишофита, 8 %-й	1.45	325	11/14/16/23/29/31/33	Низовой
Раствор бентонита, 5 %-й	10.19	320	11/13/15/16/18/19/34	Низовой
Раствор воды с примесью бентонита 10 %-й	26.2	360	13/16/17/20/21/31/45	Низовой
Раствор воды с примесью бентонита 10 %-й	26.2	340	39/43/51/57/78	Верховой
Вода + 0.3 %-й «Файрэкс»	1.14	385	60/90 – на остальных очагах горение продолжалось	Верховой
Вода + 0.3 %-й «Файрэкс»	1.14	323	13/16/17/18/22/35/84	Низовой

Верховой пожар: удельное тепловыделение $W = 2-7 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2}$; низовой пожар: удельное тепловыделение $W = 0.31-0.327 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

В частности, эти исследования подтвердили гипотезу Арцыбашева Е.С. [13] о том, что добавка смачивателя в воду может уменьшить эффективность тушения.

Результаты исследований [11, 12] также показали, что необходимо разработать специальный стандарт для проведения сертификационных испытаний добавок к воде, который учитывал бы особенности тушения лесных пожаров авиационным способом. Кроме того, необходимо оптимизировать концентрацию растворов с добавками. Это позволит увеличить величину плотности орошения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Проблемы совершенствования пожаротушения в лесах и на предприятиях лесной промышленности* // Материалы служебного совещания-семинара. г. Братск, 11–13 мая 1989 г. М.: ГУПО МВД СССР, 1989. С. 157.
2. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Москвиллин Е.А., Стрижак П.А., Карпов В.Н. Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // *Пожарная безопасность*. 2015. № 2. С. 49–55.
3. *Техническая справка по результатам обработки методики тушения лесных пожаров с использованием самолета ИЛ-76*. М.: ПО «Авиалесоохрана», НПП «ИНТЭЛ». 1993. С. 40.
4. Асовский В.П. Методы и средства совершенствования системы и технологий авиационных работ по распределению веществ (докторская диссертация). Краснодар: ВНИИ-ПАНХ, 2010. С. 421.
5. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Гостинцев Ю.А. Влияние атмосферных возмущений над пожарами на полеты авиационной техники // *Пожарная безопасность – история, состояние, перспективы*: Материалы XIV Всерос. науч.-практич. конф. Ч. 2. М.: ВНИИ-ПО, 1997. С. 101–103.
6. Журавлев Ю.Ф., Михалькова Е.П., Варюхин А.Н. Гидродинамические аспекты борьбы с лесными пожарами с помощью авиатанкеров с вертикальным сбросом воды // *Пожарная безопасность*. 2014. № 3. С. 132–140.
7. *Отчет о научно-исследовательской работе «Измерение распределения по размерам водяных капель, образованных в результате сброса воды с самолета ИЛ-76 в условиях натурного эксперимента»*. М.: НПК «Атмосферные технологии» («АТТЕХ»). 1993. С. 91.
8. Давыденко Э.П. Стратегия и тактика применения авиатанкеров для борьбы с лесными пожарами с воздуха // *Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия* // Материалы Междунар. конф. Томск; Красноярск: ТГУ. 1999. С. 58–59.
9. Копылов Н.П., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Москвиллин Е.А., Стрижак П.А., Карпов В.Н., Вагенлейтнер Е.В. Тушение диффузионного факела пламени распыленной водой (краткий обзор) // *Пожарная безопасность*. 2015. № 3. С. 109–113.
10. Сиянов А.А., Тивина Е.Н., Черных И.В. Анализ огнетушащих свойств воды в зависимости от размеров капель // *Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и их экологических последствий*: Материалы Междунар. конф. Томск; Иркутск: ТГУ, 1997. С. 149–150.
11. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Федоткин Д.В., Стрижак П.А., Карпов В.Н., Зверева-Степная А.В., Москвиллин Е.А. Стенд для испытания огнетушащих веществ, применяемых при тушении лесных пожаров авиационными средствами // *Пожарная безопасность*. 2015. № 4. С. 51–57.
12. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Москвиллин Е.А., Стрижак П.А., Карпов В.Н. Оптимизация выбора добавок к воде при тушении лесных пожаров с помощью авиации // *Пожарная безопасность*. 2016. № 4. С. 48–50.
13. Арцыбашев Е.С. Об эффективности огнетушащих химических веществ // *Лесное хозяйство*. 1981. № 6. С. 47–48.

Статья поступила 17.10.2018 г.

Kopylov N.P., Karpov V.N., Kuznetsov A.E., Fedotkin D.V., Khasanov I.R., Sushkina E.Yu. PECULIARITIES OF THE FOREST FIREFIGHTING WITH THE USE OF AIRCRAFTS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 59. pp. 79–86

DOI 10.17223/19988621/59/8

Keywords: forest fire, aerial firefighting, irrigation density, dispersion of the fire extinguishing agent, calculation of the optimum altitude of discharge and irrigation maps, water additives.

The use of aircrafts improves the efficiency of forest fires suppression. Currently, the most widely used aircrafts are GL-215 Canadair, BE-200, and Il-76. The corresponding maps and irrigation density of the extinguishing agents have been experimentally obtained for them.

The density and size of irrigation maps is significantly affected by the aircraft flight altitude. The height of the extinguishing agent discharge is determined by the safety of the flight over the fire zone, which in turn introduces significant aerodynamic disturbances into the atmosphere.

The irrigation density is influenced by dispersion and viscosity of the extinguishing agent as well as the meteorological conditions, primarily the direction and speed of wind.

In this regard, it is important to obtain the formulas for calculating optimum flight altitude, extension of zones, and irrigation density. These formulas include the parameters that take into account the characteristics of both aircraft (the speed) and drain devices (the sizes and fire flow). Investigation of the efficiency of the use of aircrafts in forest firefighting is time-consuming and expensive. It is proposed to test the water additives using a special experimental setup simulating both the dispersion of the fire extinguishing agent discharged from the aircraft and the crown and ground forest fires. The fires are simulated by specific heat release, and the dispersion, by specially selected sprinklers.

Fire experiments have shown a significant impact of the viscosity of fire extinguishing agents on the forest fire suppression. It is required to optimize viscosity by means of water additives.

KOPYLOV Nikolay Petrovich (Doctor of Technical Sciences, Professor, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation). E-mail: np.nanpb@mail.ru

KARPOV Vyacheslav Nikolaevich (Orenburg Branch FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Orenburg, Russian Federation). E-mail: v75karpov@mail.ru

KUZNETSOV Aleksandr Evgen'evich (Candidate of Technical Sciences, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation). E-mail: ae.kuznetsov@yandex.ru

FEDOTKIN Dmitriy Vyacheslavovich (Candidate of Technical Sciences, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation). E-mail: fdv982@mail.ru

KHASANOV Irek Ravil'evich (Doctor of Technical Sciences, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation). E-mail: irhas@rambler.ru

SUSHKINA Elena Yur'evna (Candidate of Technical Sciences, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation). E-mail: sushkina@bk.ru

REFERENCES

1. Problemy sovershenstvovaniya pozharotusheniya v lesakh i na predpriyatiyakh lesnoy promyshlennosti [Problems of the fire suppression improvement in the forests and at the forestry enterprises] (1989) *Proceedings of the workshop. Bratsk*. Moscow: GUPO MVD SSSR.
2. Kopylov N.P., Khasanov I.R., Kuznetsov A.E., Fedotkin D.V., Moskvilin E.A., Strizhak P.A., Karpov V.N. (2015) Parametry sbrosa vody aviatsionnymi sredstvami pri tushenii lesnykh pozharov [Parameters of water dumping by airplanes at forest fire suppression]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire Safety*. 2. pp.49–55.
3. *Tekhnicheskaya spravka po rezul'tatam obrabotki metodiki tusheniya lesnykh pozharov s ispol'zovaniem samoleta IL-76* [Technical information on the results of the applied methods of

- forest fire suppression using IL-76 aircraft] (1993) Moscow: PO «Avialesookhrana», NPP «INTEL».
4. Asovskiy V.P. (2010) *Metody i sredstva sovershenstvovaniya sistemy i tekhnologii aviatsionnykh rabot po raspredeleniyu veshchestv* [Methods and means for improvement of the system and technologies of aviation work on the distribution of substances]. Dissertation. Krasnodar: VNIIPANKh.
 5. Kopylov N.P., Khasanov I.R., Gostintsev Yu.A. (1997) Vliyanie atmosferynykh vozmushcheniy nad pozharemi na polety aviatsionnoy tekhniki [Effect of the atmospheric disturbances over the fires on the aircraft flights]. *Pozharnaya bezopasnost' – istoriya, sostoyanie, perspektivy: materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsi – Fire Safety – History, Current State, and Prospects: Proceedings of XIV all-Russian Research and Practical Conference*. 2. pp. 101–103.
 6. Zhuravlev Yu.F., Mikhail'kova E.P., Varyukhin A.N. (2014) Gidrodinamicheskie aspekty bor'by s lesnymi pozharemi s pomoshch'yu aviatankеров s vertikal'nym sbrosom vody [Hydrodynamic aspects of forest fire-fighting using airtankers with vertical liquid discharge]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire Safety*. 3. pp. 132–140.
 7. *Izmerenie raspredeleniya po razmeram vodyanykh kapel', obrazovannykh v rezul'tate sbrosa vody s samoleta IL-76 v usloviyakh naturnogo eksperimenta* [Measurement of the size distribution of water droplets resulting from the water discharge from the IL-76 aircraft in a full-scale experiment] (1993) Research Report. Moscow: NPK Atmosfernye tekhnologii.
 8. Davydenko E.P. (1999) Strategiya i taktika primeneniya aviatankеров dlya bor'by s lesnymi pozharemi s vozdukhа [Strategy and tactics of the use of airtankers in the forest firefighting from the air]. *Pozhary v lesu i na ob'ektakh lesokhimicheskogo kompleksa: vozniknovenie, tushenie i ekologicheskie posledstviya – Fires in the forest and at the forest chemical complex: occurrence, extinguishing, and environmental consequences*. Materials of International Conference. Tomsk; Krasnoyarsk: TGU. pp. 58–59.
 9. Kopylov N.P., Kuznetsov A.E., Fedotkin D.V., Moskvilin E.A., Strizhak P.A., Karpov V.N., Vagenleytner E.V. (2015) Tushenie diffuzionnogo fakela plameni raspylennoy vodoy (kratkiy obzor) [Suppression of the diffusive flame torch by the sprayed water (short review)] *Pozharnaya bezopasnost' – Fire Safety*. 3. pp. 109–113.
 10. Siyanov A.A., Tivina E.N., Chernykh I.V. (1997) Analiz ognетushashchikh svoystv vody v zavisimosti ot razmerov kapel' [Analysis of the fire extinguishing properties of water depending on the droplet size]. *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov i ikh ekologicheskikh posledstviy: materialy mezhdunarodnoy konferentsii – Mathematical and physical modeling of the forest fires and their environmental consequences: proceedings of the international conference*. Tomsk; Irkutsk: TGU. pp. 149–150.
 11. Kopylov N.P., Khasanov I.R., Fedotkin D.V., Strizhak P.A., Karpov V.N., Zvereva-Stepnaya A.V., Moskvilin E.A. (2015) Stend dlya ispytaniya ognетushashchikh veshchestv, primenyaemykh pri tushenii lesnykh pozharov aviatsionnymi sredstvami [Test bench for fire extinguishing agents applied at forest fire suppression by aviation]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire Safety*. 4. pp. 51–57.
 12. Kopylov N.P., Khasanov I.R., Kuznetsov A.E., Fedotkin D.V., Moskvilin E.A., Strizhak P.A., Karpov V.N. (2016) Optimizatsiya vybora dobavok k vode pri tushenii lesnykh pozharov s pomoshch'yu aviatsii [Optimization of the choice of additives to water at forest fires suppression by means of aircraft]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire Safety*. 4. pp. 48–50.
 13. Artsybashev E.S. (1981) Ob effektivnosti ognетushashchikh khimicheskikh veshchestv [On the effectiveness of fire extinguishing chemicals]. *Lesnoe khozyaystvo*. 6. pp. 47–48.

Received: October 17, 2018