МЕХАНИКА

УДК 532.543

DOI 10.17223/19988621/62/6

В.А. Архипов, О.В. Матвиенко, И.К. Жарова,
Е.А. Маслов, К.Г. Перфильева, А.М. Булавко

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЖИДКО-КАПЕЛЬНОГО ХЛАДАГЕНТА
ПРИ АВИАЦИОННОМ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ¹**

Представлена математическая модель эволюции облака жидко-капельного аэрозоля в атмосфере при сбросе хладагента в очаг пожара из водосливного устройства летательного аппарата. Модель включает уравнения движения полидисперсных капель в поле силы тяжести с учетом их дробления, испарения и силы ветра. Приведены некоторые результаты расчетов траектории, температуры и размеров капель для типичных условий авиационного тушения пожаров.

Ключевые слова: авиационное тушение пожаров, жидко-капельное облако, гравитационное осаждение, высокотемпературная среда, очаг пожара, дробление и испарение капель, математическое моделирование.

Одним из эффективных способов тушения крупных пожаров, особенно в труднодоступных районах, является сброс хладагента в очаг пожара с борта самолета или вертолета. В качестве хладагента используется, как правило, тонкораспыленная вода. При воздействии распыленной воды на пламя реализуется объемно-поверхностный механизм взаимодействия. Тонкораспыленная вода охлаждает зону горения и одновременно за счет испарения блокирует паром доступ кислорода к горящим элементам. Эффективное использование этого способа базируется на закономерностях осаждения жидко-капельного облака и его взаимодействия со средой вблизи очага пожара. Эти закономерности являются фундаментальной основой для разработки оптимальных режимов использования средств авиации для тушения пожаров с учетом реальных условий.

Основной объем публикаций по проблемам пожаротушения с применением авиации относится к техническим аспектам реализации процесса сброса хладагента в очаг пожара [1, 2]. При моделировании процессов тушения очага пожара необходимо рассматривать три стадии: процесс разрушения макрообъема жидкости, сбрасываемого из сливного устройства с образованием первичного облака полидисперсных капель [3, 4]; эволюция аэрозольного облака при осаждении в изотермических условиях [5, 6]; взаимодействие жидко-капельного облака с очагом пожара [7, 8].

Ввиду сложности процесса разрушения макрообъема жидкости теоретическое описание не позволяет получить приемлемых для практики рекомендаций по высоте образования и характеристикам первичного облака капель [3]. Перспектив-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014).

ным подходом является моделирование на основе экспериментальных исследований на специальных установках с последующим обобщением результатов в виде критериального уравнения, включающего числа Рейнольдса, Вебера, Бонда, Фруда и соответствующие симплексы [4, 9 – 11].

В настоящей работе рассмотрена математическая модель эволюции аэрозольного облака, образующегося после фрагментирования макрообъема жидкого хладагента и взаимодействие капель с очагом пожара. Приведены результаты численного моделирования движения, нагрева и испарения полидисперсных капель воды, поступающих в очаг пожара.

Математическая постановка задачи

Формирование первичного жидко-капельного облака происходит при выбросе в атмосферу хладагента массой M вследствие аэродинамического дробления макрообъема жидкости на фрагменты в виде полидисперсных сферических капель разного начального диаметра $d_{s0} = 2r_{s0}$. Фрагментирование макрообъема жидкого хладагента реализуется на заданной высоте h . Динамика жидко-капельного облака рассматривается как гравитационное осаждение капель каждого размера с учетом скорости и направления ветра, скорости подъема нагретого воздуха из очага пожара. В процессе эволюции жидко-капельного облака учитывается теплообмен капель с окружающей средой и изменение их размеров за счет испарения. При осаждении учитываются процессы дробления капель. В рамках указанных положений динамика и тепломассообмен жидко-капельного облака в декартовой системе координат $\{x, y, z\}$ (ось Oz направлена вертикально вверх, ось Ox – в направлении движения летательного аппарата) описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{du_s}{dt} &= \varphi(u - u_s), \quad \frac{dv_s}{dt} = \phi(v - v_s), \quad \frac{dw_s}{dt} = \varphi(w - w_s) - g, \\ \frac{dT_s}{dt} &= \frac{3}{2} \frac{\lambda}{r_s^2 \rho_s c_p} \text{Nu}(T - T_s) - \frac{q_{\text{vap}} m_{\text{vap}}}{m_s c_p}, \quad \frac{dr_s}{dt} = -\frac{k}{\rho_s} \frac{p_0}{p - p_0}. \end{aligned} \quad (1)$$

Система (1) дополняется кинематическими соотношениями:

$$\frac{dx}{dt} = u_s, \quad \frac{dy}{dt} = v_s, \quad \frac{dz}{dt} = w_s. \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) $U(u, v, w)$, $U_s(u_s, v_s, w_s)$ – векторы скорости воздуха и капель; t – время; $\varphi = 3\rho C_D |U - U_s| / (8\rho_s r_s)$; ρ , ρ_s – плотность воздуха и жидкости; r_s – радиус капли; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления; g – ускорение свободного падения; T , T_s – температура воздуха и капли (осредненная по объему капли); λ – коэффициент теплопроводности воздуха; c_p – удельная теплоемкость жидкости; Nu – число Нуссельта; q_{vap} – удельная теплота испарения жидкости; m_{vap} – масса испарившейся жидкости; m_s – масса капли; k – коэффициент массоотдачи; p , p_0 – давление окружающей среды и парциальное давление пара.

В предположении о сферической форме капель значения коэффициента аэродинамического сопротивления C_D и числа Нуссельта Nu определялись в зависимости от режимов обтекания по формулам [12]:

- стоксовский режим ($\text{Re} \leq 1$):

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}}, \quad \text{Nu} = 2,$$

- переходный режим ($1 < Re < 10^3$):

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}, \quad Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3};$$

- турбулентный режим ($Re > 10^3$):

$$C_D = 0.44, \quad Nu = \frac{0.37 Re^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)},$$

где Pr – число Прандтля.

Число Рейнольдса рассчитывалось по относительному движению капли

$$Re = \frac{2\rho|U - U_s|r_s}{\mu},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры определялась по формуле Сазерленда (Sutherland):

$$\mu = \frac{0.69 \cdot 10^{-2}}{T + 122} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}.$$

В качестве критерия дробления капель за счет неустойчивости Рэлея–Тейлора принималось критическое значение числа Бонда $Bo_* = (4\rho_s g r_s^2)/\sigma = 90$ (g – ускорение массовых сил, σ – поверхностное натяжение), за счет неустойчивости Кельвина–Гельмгольца – критическое значение числа Вебера $We_* = 2\rho|U - U_s|^2 r_s/\sigma = 17$. Предполагалось, что при достижении критических значений числа Бонда или числа Вебера капля дробится на две сферические капли равной массы [11]. Процесс испарения моделировался в соответствии с моделью приведенной пленки [13] и диффузионной моделью [6].

При выбросе в атмосферу макрообъема жидкого хладагента в результате спонтанного дробления отдельных неустойчивых фрагментов образуется первичное облако капель жидкости. Дифференциальная функция счетного распределения капель в первичном облаке близка к экспоненциальной. При численном моделировании была принята функция распределения числа капель жидкости по размерам [14]:

$$f(d_{s0}) = a \exp(-3.12 d_{s0}), \quad (3)$$

где $a = 1.575 \text{ мм}^{-1}$ – нормирующий множитель.

При проведении расчетов с учетом распределения (3) рассматривались шесть фракций капель одинакового диаметра $(d_{s0})_i$. Значения счетной C_{ni} и массовой C_{mi} доли капель каждой фракции приведены в таблице.

Доли каждой фракции в первичном облаке хладагента

Фракция	$(d_{s0})_i$, мм	C_{ni} , %	C_{mi} , %
1	0.5	54.7	1.2
2	1.0	25.0	9.5
3	1.5	11.5	19.7
4	2.0	5.3	24.9
5	2.5	2.4	24.3
6	3.0	1.1	20.4

В первом приближении очаг пожара можно моделировать областью радиусом r_0 (радиус очага горения) с повышенной температурой на поверхности земли. Очаг пожара характеризуется высотой зоны горения z_0 и средней температурой в зоне горения T_f . В случае стационарного горения эти величины рассматриваются как отражающие особенности рассматриваемой задачи; в общем случае необходимо рассматривать их изменение с течением времени.

При разработке методов расчета структуры течения в тепловой колонке можно использовать интегральный подход с целью количественного описания течения в целом [15]. В рамках этого подхода делаются предположения о форме профилей скорости, температуры и концентрации по горизонтальному сечению струи восходящего факела, а также о характере вовлечения окружающего воздуха по длине струи. Затем основные уравнения сводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям, которые интегрируются по продольной координате. Согласно экспериментальным данным, приведенным в монографии [16], радиальные распределения параметров течения $w(r)$, $\Delta T(r)$ в любом поперечном сечении подобны и соответствуют распределению Гаусса [17]:

$$w(r) = w_0 \exp\left(-\frac{l^2}{2r^2}\right), \quad \Delta T(r) = (\Delta T)_0 \exp\left(-\frac{l^2}{2r^2}\right), \quad (4)$$

где w_0 , $(\Delta T)_0$ – вертикальная составляющая скорости и перегрев на оси тепловой колонки; l – расстояние от центра очага пожара.

В монографии [18] показано, что в случае изотермической атмосферы с температурой T_a изменение радиуса тепловой колонки, температуры и вертикальной составляющей скорости на оси струи может быть описано следующими выражениями:

$$r = r_0 + \alpha z, \quad (\Delta T)_0 = (T_f - T_a) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-5/3}, \quad w_0 = w_* \frac{T_f - T_a}{T_a} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-1/3}, \quad (5)$$

где α – коэффициент вовлечения, величина которого изменяется в диапазоне от 0.115 до 0.153; $w_* = 0.6-1.2$ м/с – параметр, характеризующий скорость подъема продуктов горения.

На рис. 1, 2 представлено изменение с высотой вертикальной составляющей скорости и температуры на оси тепловой колонки, рассчитанные для различных радиусов пожара ($T_f = 1000$ К). Из рисунков видно, что с ростом высоты температура и вертикальная составляющая скорости уменьшаются. Увеличение размеров пожара приводит к увеличению выделяемой тепловой энергии. В результате температура на оси тепловой колонки, а также вертикальная составляющая скорости возрастают.

Результаты численного моделирования

Численное моделирование эволюции облака жидко-капельного аэрозоля при осаждении в высокотемпературной среде проведено для различных начальных размеров капель воды (таблица). Предполагалось, что фрагментирование макрообъема жидкого хладагента реализуется на высоте $h = 150$ м от поверхности земли на расстоянии 40 м от очага пожара. Температура окружающей среды составляла 20 °С. Математическое моделирование проводилось для случая полного штиля: скорость ветра полагалась равной нулю. В расчетах принималось, что радиус очага пожара составляет $r_0 = 10$ м, средняя температура в зоне горения $T_f = 750$ К, что соответствует лесному пожару средней интенсивности [19].

Рис. 1. Изменение с высотой вертикальной составляющей скорости на оси тепловой колонки: 1 – $r_0 = 50$ м, 2 – $r_0 = 20$ м, 3 – $r_0 = 10$ м

Fig. 1. Variation in the vertical velocity component on the heat column axis with the height: $r_0 = (1)$ 50, (2) 20, and (3) 10 m

Рис. 2. Изменение с высотой температуры на оси тепловой колонки: 1 – $r_0 = 50$ м, 2 – $r_0 = 20$ м, 3 – $r_0 = 10$ м

Fig. 2. Variation in the temperature on the heat column axis with the height: $r_0 = (1)$ 50, (2) 20, and (3) 10 m

Начальная температура капель выбиралась равной температуре окружающей среды. Вертикальная составляющая скорости капль равна скорости их стационарного осаждения в турбулентном режиме [12], горизонтальная составляющая скорости капль равна 10 м/с. Приведенные исходные данные соответствуют сбросу хладагента (воды) при пожаротушении с помощью водосливного устройства ВСУ–5, размещенного на борту вертолета [1].

На рис. 3 приведены траектории капль различных начальных размеров (кривые 1 – 4), а также граница тепловой колонки (кривая 5). Как известно, движение капль определяется их размером и скоростью. Сила сопротивления, действующая на капль с начальным размером $d_{s0} = 1$ мм, приводит к значительному

уменьшению горизонтальной составляющей скорости. В результате капли этого размера оказываются не в состоянии проникнуть в центральную часть тепловой колонки (кривая 1). Основная часть траектории капель проходит через ее периферийную часть. В этой области происходит прогрев капель до 333–343 К и выпадение на подстилающую поверхность. С увеличением начального размера капля происходит увеличение их инерционности. В результате этого горизонтальная составляющая скорости увеличивается и капли проникают в центральную часть тепловой колонки. При этом происходит их интенсивный нагрев и испарение на высоте 20–30 м от поверхности земли (рис. 4). Близость траекторий и температурных кривых для капель с начальным размером $d_{s0} > 1.5$ мм объясняется процессами их дробления.

Рис. 3. Траектории капель: 1 – $d_{s0} = 1$ мм, 2 – $d_{s0} = 1.5$ мм, 3 – $d_{s0} = 2$ мм, 4 – $d_{s0} = 3$ мм, 5 – граница тепловой колонки

Fig. 3. Trajectories of the droplets: $d_{s0} = (1)$ 1, (2) 1.5, (3) 2, and (4) 3 mm; 5, a heat column boundary

Рис. 4. Температура капель: 1 – $d_{s0} = 1$ мм, 2 – $d_{s0} = 1.5$ мм, 3 – $d_{s0} = 2$ мм, 4 – $d_{s0} = 3$ мм

Fig. 4. Temperature of the droplets: $d_{s0} = (1)$ 1, (2) 1.5, (3) 2, and (4) 3 mm

На рис. 5 представлены зависимости текущего диаметра капель от высоты, рассчитанные для различных начальных размеров капель. Как видно из рис. 5, можно выделить несколько этапов дробления капель. Сначала происходит разгон капель до скорости, соответствующей критическому значению числа Вебера. Затем следует серия дроблений капель по траектории их осаждения. После достижения гидродинамической устойчивости процессы дробления капель прекращаются. Таким образом, на высоте 70 м капли разных начальных фракций $(d_{s0})_i$ достигают примерно одного размера.

Рис. 5. Диаметр капель: 1 – $d_{s0} = 1$ мм, 2 – $d_{s0} = 1.5$ мм, 3 – $d_{s0} = 2$ мм, 4 – $d_{s0} = 3$ мм

Fig. 5. Diameter of the droplets: $d_{s0} = (1)$ 1, (2) 1.5, (3) 2, and (4) 3mm

Выводы

- Представлена физико-математическая модель эволюции облака жидко-капельного аэрозоля при сбросе хладагента из водосливного устройства летательного аппарата. Модель включает уравнения движения и энергии полидисперсных капель при их гравитационном осаждении в атмосфере с учетом дробления капель по механизмам Рэлея – Тейлора и Кельвина – Гельмгольца, нагрева и испарения капель, направления и скорости ветра.

- В качестве начальных данных задаются вертикальная координата образования первичного аэрозольного облака, начальная функция распределения капель по размерам, их начальная скорость и температура, параметры атмосферы, радиус очага пожара и средняя температура в зоне пожара. Для определения вертикальной координаты образования первичного аэрозольного облака предлагается использование экспериментальных данных, полученных на специальных установках, с последующим обобщением результатов в виде критериального уравнения, включающего числа Рейнольдса, Вебера, Бонда, Фруда и соответствующие симплексы.

- Приведены некоторые результаты расчетов траектории, температуры и размеров капель для типичных условий авиационного тушения пожара при отсутствии ветра.

• Разработанная модель может служить основой для расчета высоты и траектории сброса хладагента, обеспечивающих эффективное тушение пожара средствами авиации с учетом реальных метеорологических условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асовский В.П. Особенности тушения лесных пожаров вертолетами с использованием подвесных водосливных устройств // Научный вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2009. № 138. С. 142–149.
2. Копылов Н.П., Карпов В.Н., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Хасанов И.Р., Сушкина Е.Ю. Особенности тушения лесных пожаров с применением авиации // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 59. С. 79–86. DOI 10.17223/19988621/59/8.
3. Кудров М.А. Динамика объема жидкости в газовом потоке с учетом деформации дробления и срыва капель // Научный вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2010. № 151. С. 163–168.
4. Мешков Е.Е., Орешков В.О., Ямбаев Г.М. Образование облака капель при разрушении водяного ядра в процессе свободного падения // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 15. С. 79–85.
5. Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А., Ткаченко А.С. Прогнозирование экологических последствий распространения облака токсичных аэрозолей в районах падения отработанных ступеней ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 1. С. 89–93.
6. Arkhipov V.A., Kozlov E.A., Titov S.S., Tkachenko A.S., Usanina A.S., Zharova I.K. Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere // Arabian Journal of Geosciences. 2016. No. 9. P. 114. DOI 10.1007/s12517-015-2161-4.
7. Алеханов Ю.В., Блинецов М.В., Власов Ю.А. и др. Метод исследования взаимодействия диспергированной воды с пламенем // ФГВ. 2006. Т. 42. № 1. С. 57–64.
8. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Analysis of the effect exerted by the Initial temperature of atomized water on the integral characteristics of its evaporation during motion through the zone of “hot” gases // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2014. V. 87. No. 2. P. 450–458.
9. Накоряков В.Е., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Деформация водяного снаряда при его свободном падении в воздухе // Докл. АН. 2016. Т. 467. № 5. С. 537–542. DOI: 10.7868/S0869565216110104.
10. Накоряков В.Е., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О предельных поперечных размерах капельного облака при разрушении водяного массива в процессе падения с большой высоты // Докл. АН. 2017. Т. 475. № 2. С. 145–149. DOI: 10.7868/S0869565217020062
11. Архипов В.А., Басалаев С.А., Булавко А.Н., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н. Установка для исследования динамики разрушения сферического макрообъема жидкости при свободном падении в воздухе // Патент на изобретение РФ № 2705965, опубл.: 12.11.2019. Бюл. № 32.
12. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987.
13. Архипов В.А., Матвиенко О.В., Трофимов В.Ф. Горение распыленного жидкого топлива в закрученном потоке // ФГВ. 2005. Т. 41. № 2. С. 26–37.
14. Ткаченко А.С., Маслов Е.А., Усанина А.С., Орлов С.Е. Программа расчета жидкокапельного аэрозольного облака // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610567, опубл.: 20.02.2016.
15. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
16. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 280 с.
17. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985.

18. Гебхарт Б., Джайлурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло и массообмен. Т. 1. М.: Мир, 1991.
19. Grishin A.M. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. 390 p.

Статья поступила 13.11.2019 г.

Arkhipov V.A., Matvienko O.V., Zharova I.K., Maslov E.A., Perfilieva K.G., Bulavko A.M. (2019) MODELING OF THE DYNAMICS OF A LIQUID-DROPLET COOLANT UNDER AERIAL FIREFIGHTING *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. pp. 68–78

DOI 10.17223/19988621/62/6

Keywords: aerial firefighting, liquid-droplet cloud, gravitational deposition, high-temperature environment, seat of fire, fragmentation and evaporation of droplets, mathematical modeling.

A mathematical model of the evolution of liquid-droplet aerosol cloud during the coolant discharge from a helibucket into the seat of fire is presented. The analysis of the main stages of coolant discharge is carried out. In the process of gravitational deposition of droplet cloud, the following aspects are taken into account: the droplet fragmentation by the Rayleigh–Taylor and Kelvin–Helmholtz mechanisms; the evaporation in a temperature field of a convective column; and the effect of the wind on the trajectories of droplets. The temperature and velocity distributions along the convective column above the seat of fire are simulated using the Yu.A. Gostintsev model. The velocity of the droplets is calculated in accordance with a trajectory approach. The calculation of the droplet evaporation is carried out in the framework of diffusion model and reduced film model. The computational results on the characteristics of the cloud of droplets penetrating into the seat of fire under typical conditions of aerial firefighting with the use of helibucket are presented.

Financial support: This study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 15-19-10014).

Vladimir A. ARKHIPOV (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Oleg V. MATVIENKO (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russian Federation). E-mail: matvolegv@mail.ru

Irina K. Zharova (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: zharova@niipmm.tsu.ru

Evgeniy A. MASLOV (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: maslov_eugene@mail.ru

Kseniya G. PERFIL'eva (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Anton M. BULAVKO (EMERCOM of Russia, Tomsk, Russian Federation). E-mail: anbulavko@gmail.com

REFERENCES

1. Asovsky V.P. (2009) Osobennosti tusheniya lesnykh pozharov vertoletami s ispol'zovaniem podvesnykh vodoslivnykh ustroystv [Peculiarities of forest firefighting by helicopters with spillway devices on the external sling]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA – Civil Aviation High Technologies*. 138. pp. 142–149.
2. Kopylov N.P., Karpov V.N., Kuznetsov A.E., Fedotkin D.V., Khasanov I.R., Sushkina E.Yu. (2019) Osobennosti tusheniya lesnykh pozharov s uchetoм aviatsii [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.
3. Kudrov M.A. (2010) Dinamika ob"ema zhidkosti v gazovom potoke s uchetoм deformatsii drobleniya i sryva kapel' [Dynamics of the fluid volume in the gas flow considering deformation, fragmentation and blowoff of drops]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA – Civil Aviation High Technologies*. 151. pp. 163–168.
4. Meshkov E.E., Oreshkov V.O., Yambaev G.M. (2011) Obrazovanie oblakov kapel' pri razrushenii vodyanogo yadra v protsesse svobodnogo padeniya [Droplet cloud formation upon disintegration of free-falling water ball]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics Letters*. 37(15). pp. 79–85. DOI: 10.1134/S1063785011080116.
5. Arkhipov V.A., Zharova I.K., Kozlov E.A., Tkachenko A.S. (2015) Prognozirovaniye ekologicheskikh posledstviy raspriostaneniya oblakov toksichnykh aerorozley [Prediction of ecological consequences of toxic aerosol clouds spreading in the fall areas of waste booster stages]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Optics*. 28(1). pp. 89–93.
6. Arkhipov V.A., Kozlov E.A., Titov S.S., Tkachenko A.S., Usanina A.S., Zharova I.K. (2016) Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere. *Arabian Journal of Geosciences*. 9(2). p. 114. DOI: 10.1007/s12517-015-2161-4.
7. Alekhanov Yu.V., Bliznetsov M.V., Vlasov Yu.A., Gerasimov S.I., Dudin V.I., Levushov A.E., Logvinov A.I., Lomtev S.A., Marmyshev V.V., Meshkov E.E., Semenov Yu.K., Tsykin S.V. (2006) Metod issledovaniya vzaimodeystviya dispergirovannoy vody s plamenem [Method for studying the interaction of dispersed water with flame]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 42(1). pp. 57–64. DOI: 10.1007/s10573-006-0006-x.
8. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. (2014) Analysis of the effect exerted by the Initial temperature of atomized water on the integral characteristics of its evaporation during motion through the zone of "hot" gases. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 87(2). pp. 450–458. DOI: 10.1007/s10891-014-1031-3.
9. Nakoryakov V.E., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. (2016) Deformatsiya vodyanogo snaryada pri ego svobodnom padenii v vozdukh [Deformation of a water projectile during its free fall in air]. *Doklady Akademii nauk – Doklady Physics*. 467(5). pp. 537–542. DOI: 10.7868/S0869565216110104.
10. Nakoryakov V.E., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. (2017) O predel'nykh poperechnykh razmerakh kapel'nogo oblaka pri razrushenii vodyanogo massiva v protsesse padeniya s bol'shoй vysoty [Limited transverse sizes of a droplet cloud under disintegration of a water mass during its fall from a great height]. *Doklady Akademii nauk – Doklady Physics*. 475(2). pp. 145–149. DOI: 10.7868/S0869565217020062.
11. Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Bulavko A.N., Zolotorev N.N., Perfilieva K.G., Polenchuk S.N. (2019) Ustanovka dlya issledovaniya dinamiki razrusheniya sfericheskogo makroob"ma zhidkosti pri svobodnom padenii v vozdukh [Facility for studying the dynamics of the destruction of a spherical liquid macrovolume during its free fall in air]. RF Patent 2705965.
12. Nigmatulin R.I. (1991) *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka.
13. Arkhipov V.A., Matvienko O.V., Trofimov V.F. (2005) Gorenije raspylennogo zhidkogo topliva v zakruchennom potoke [Combustion of sprayed liquid fuel in a swirling flow]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 41(2). pp. 26–37. DOI: 10.1007/s10573-005-0016-0.

14. Tkachenko A.S., Maslov E.A., Usanina A.S., Orlov S.E. (2016) *Programma rascheta zhidkokapel'nogo aerol'nogo oblaka* [Computational program for liquid-droplet aerosol cloud]. Certificate of state registration of computer programs 2016610567.
15. Berland M.E. (1975) *Sovremennye problemy atmosfery diffuzii i zagryazneniya atmosfery* [Modern problems of atmospheric diffusion and pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
16. Byzova N.L., Garger E.K., Ivanov V.N. (1991) *Eksperimental'nye issledovaniya atmosfery diffuzii i raschety rasseyaniya primesi* [Experimental studies of atmospheric diffusion and calculations of impurity scattering]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
17. Berland M.E. (1985) *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Prediction and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
18. Gebkhart B., Dzhayluriya Y., Makhadzhan R., Sammakiya B. (1991) *Svobodnokonvektivnye techeniya, teplo i massoobmen* [Free-convection currents, heat and mass transfer]. Part 1. Moscow: Mir.
19. Grishin A.M. (1997) *Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting Them*. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University.

Received: November 13, 2019