

**В.А. Архипов, А.П. Березиков, Е.А. Козлов, О.В. Матвиенко*,
А.С. Ткаченко**, В.Ф. Трофимов, У.М. Шереметьева**

Моделирование распространения аэрозольного облака при выбросе жидких ракетных топлив в атмосферу

*Томский государственный университет
НИИ прикладной математики и механики*

**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

***Томский государственный педагогический университет*

Поступила в редакцию 3.02.2004 г.

Представлена физико-математическая модель эволюции облака токсичных компонентов жидких ракетных топлив при авариях и разделении ступеней ракет-носителей, разработанная с учетом полидисперсности капель, нестационарности их движения и характеристик преобладающего ветра. В данную модель включены учет процесса нагрева и охлаждения капель в разных слоях атмосферы, процессов фазовых переходов, аэродинамического дробления капель и турбулентная диффузия. Приведены некоторые результаты расчетов для типичных компонентов жидких ракетных топлив.

При разделении ступеней ракет-носителей на жидком топливе возможен выброс в атмосферу гарантийного запаса горючего и окислителя. Аналогичный выброс жидкокапельных компонентов возможен при авариях ракет в атмосфере или при падении на земную поверхность. В последнем случае компоненты топлива частично самовоспламеняются и образовавшаяся смесь продуктов горения и жидкокапельных компонентов поднимается до высоты зависания, а затем осаждается под действием силы тяжести. При выбросе этих компонентов реализуется совокупность сложных взаимосвязанных физико-химических процессов (испарение, химические гетерогенные реакции, диффузия, коагуляция и дробление капель и т.д.), в результате которых токсичные компоненты будут распространяться в пространстве и, в конечном счете, оседать на земной поверхности.

Для оценки экологических последствий подобных ситуаций и уровня причиненного материального ущерба пострадавшим территориям необходимо иметь достоверные физико-математические модели рассматриваемых процессов. Отметим, что одним из важнейших параметров модели является вертикальная координата момента разгерметизации (высота полета), поскольку все основные характеристики окружающей среды (плотность, температура, давление, химический состав, направление и сила преобладающего ветра) зависят от этого параметра. Зависимость характеристик атмосферы от высоты достаточно подробно изучена и может быть введена в разрабатываемую модель из соответствующих справочных изданий. При построении физико-математической модели распространения жидкокапельных токсичных компонентов необходимо детализировать следующие процессы:

1. Процесс образования первичного облака капель в момент разгерметизации топливных емкостей.
2. Процессы равновесного и неравновесного испарения капель при резком изменении внешних условий вследствие разгерметизации.
3. Диффузионное распространение компонентов с учетом преобладающего ветра.
4. Химическое реагирование топливных компонентов с компонентами окружающей атмосферы.
5. Процессы гравитационного осаждения капель с учетом их испарения, дробления при взаимодействии с газом, а также процессы гравитационной коагуляции и дробления при взаимных столкновениях капель разных размеров.

Поведение капель ракетных топлив, в основном горючего — несимметричного диметилгидразина (НДМГ), при падении с больших высот рассматривалось в ряде работ [1–4]. При расчете скорости гравитационного осаждения капель в этих работах использовалась, как правило, зависимость для стационарной (установившейся) скорости падения капли, полученная введением поправочного множителя в закон Стокса. Анализ режимов осаждения капель с учетом параметров стандартной атмосферы и значений чисел Рейнольдса и Вебера показал, что использование стационарной зависимости для скорости падения капли приемлемо только для условий вблизи земной поверхности (время релаксации не превышает нескольких секунд). На больших высотах разгерметизации топливных баков (выше 50–100 км) в условиях низкой плотности атмосферы капли приобретают стационарную скорость после пролета значительных расстояний (до десятков километров).

В работах [5–7] рассмотрена модель эволюции облака токсичных, монодисперсных жидкокапельных

компонентов с учетом динамики нарастания скорости капель и уточненной зависимости для коэффициента аэродинамического сопротивления в нестоксовском режиме. Среди немногих экспериментальных работ следует отметить работу [8], в которой проведены самолетные исследования аэрозольного следа при выбросе из падающей ступени ракеты-носителя гарантийного запаса окислителя — азотного тетраоксида.

В настоящей статье представлены физико-математическая модель и некоторые результаты расчетов эволюции облака типичных компонентов жидких ракетных топлив — НДМГ (гептила), азотного тетраоксида и керосина при разгерметизации ракет-носителей. В данной модели рассмотрены процессы ускорения полидисперсных капель при их гравитационном осаждении, процессы нагрева и охлаждения в разных слоях атмосферы, процессы испарения и турбулентной диффузии с учетом преобладающего ветра. С целью экспериментального подтверждения адекватности модели ряд расчетов проведен для дождевых капель.

Наиболее сложными вопросами, требующими дополнительных исследований, представляются процессы образования первичного облака капель при разгерметизации топливных баков и параметры динамического взаимодействия капель в процессе гравитационной коагуляции. При разгерметизации в результате значительных перепадов давления происходит выброс жидкости, сопровождающийся ее дроблением на фрагменты, потерей устойчивости последних с образованием более мелких капель. В результате этих процессов формируется исходное облако с некоторой функцией $g(r)$ массового распределения капель по размерам (r — радиус капли).

Ввиду того что указанные процессы трудно поддаются детерминированному описанию и зависят от целого ряда случайных факторов, в частности от динамики и геометрии разгерметизации топливной емкости, целесообразно представить $g(r)$ в виде логарифмически нормального распределения, следуя идее А.Н. Колмогорова [9]. В настоящей статье для описания спектра размеров капель в исходном облаке использовалась формула Розина—Раммлера [10]:

$$g(r) = (n/r_*^n) r^{n-1} \exp[-(r/r_*)^n], \quad (1)$$

где n , r_* — параметры распределения.

Как показано в [11], уравнение (1) хорошо аппроксимирует логарифмически нормальное распределение в широком диапазоне параметров n , r_* . Функция $g(r)$ нормирована на единицу, т.е.

$$\int_0^{\infty} g(r) dr = 1. \text{ Модальный радиус (соответствующий}$$

максимуму функции распределения) $r_m = r_*/\sqrt{2}$. При этом $g(r)dr$ — массовая (или объемная) доля капель, размеры которых лежат в диапазоне $(r, r + dr)$. Значения параметров $n = 2$, $r_* = 2$ мм выбраны в соответствии с анализом эксперимен-

тальных данных по размерам дождевых капель [12–14].

В расчетах распределение (1) аппроксимировалось шестью фракциями капель (рис. 1), размеры r_i и массовые доли $z_i = c_{m,i}/c_m$ которых приведены в табл. 1 ($c_{m,i}$ — массовая концентрация капель i -й фракции; c_m — массовая концентрация капель в облаке).

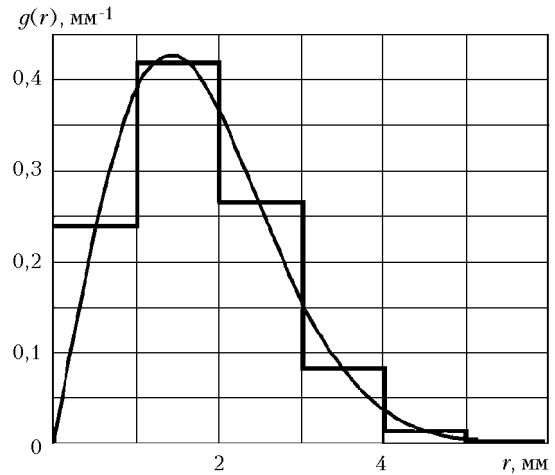


Рис. 1. Распределение Розина—Раммлера

Таблица 1

Начальное распределение капель по размерам

Номер фракции	1	2	3	4	5	6
r_i , мм	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
z_i	0,231	0,422	0,258	0,078	0,010	0,001

Рассматривался следующий сценарий образования и эволюции облака капель. После разгерметизации топливных баков ракеты-носителя (в результате аварии или при разделении ступеней) и дробления выброшенной массы жидкости M на фрагменты на некоторой высоте H от уровня земной поверхности образуется облако объемом V , содержащее равномерно перемешанные капли, распределение размеров которых соответствует уравнению (1). Минимальный объем образовавшегося облака капель V_{\min} можно оценить по формуле (для случая «плотной упаковки» сферических частиц)

$$V_{\min} = 6M/(\pi\rho_p), \quad (2)$$

где ρ_p — плотность жидкости.

В действительности за счет рассеивания капель объем будет больше и определится формулой

$$V = a^3 V_{\min}, \quad (3)$$

где a — коэффициент, учитывающий рассеивание капель ($a = 1$ соответствует «плотной упаковке»; $a = 2$ — расстояние между каплями равно их диаметру; $a = 3$ — расстояние между каплями равно двум диаметрам и т.д.). Приняв $a = 10$, по формулам (2), (3) можно оценить начальный объем V_0 или радиус R_0 облака капель (в предположении его

сферичности). Так, например, для капель несимметричного диметилгидразина ($\rho_p = 790 \text{ кг/м}^3$) при $M = 100 \text{ кг}$ радиус первичного облака $R_0 = 3,8 \text{ м}$. Следует отметить, что для корректного выбора коэффициента рассеяния a требуется априорная информация о процессе образования первичного облака капель, которая может быть получена непосредственным наблюдением или из решения соответствующей обратной задачи (по аналогии с [3, 4]).

Однако с учетом того, что $R_0 \ll H$, величина R_0 не должна сильно влиять на эволюцию облака за счет турбулентной диффузии в атмосфере.

Уравнение движения капель i -й фракции записывается в виде

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_{p,i}}{dt} = \sum_j \mathbf{F}_j, \quad (4)$$

где $\mathbf{v}_{p,i}$ – вектор скорости капель i -й фракции; $m_i = (4\pi r_i^3/3)\rho_p$ – масса капли i -й фракции; \mathbf{F}_j – действующие на каплю силы.

Без учета силы Архимеда ввиду ее малости уравнения движения в проекциях на оси декартовой системы координат x, y, z (ось z направлена по направлению вектора ускорения свободного падения \mathbf{g}) имеют вид [15]:

$$\begin{aligned} \frac{du_{p,i}}{dt} &= \frac{3\rho}{8\rho_p r_i} C_D |\mathbf{v} - \mathbf{v}_{p,i}| (u - u_{p,i}), \\ \frac{dv_{p,i}}{dt} &= \frac{3\rho}{8\rho_p r_i} C_D |\mathbf{v} - \mathbf{v}_{p,i}| (v - v_{p,i}), \\ \frac{dw_{p,i}}{dt} &= \frac{3\rho}{8\rho_p r_i} C_D |\mathbf{v} - \mathbf{v}_{p,i}| (w - w_{p,i}) + m_i g. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$|\mathbf{v} - \mathbf{v}_{p,i}| = \sqrt{(u - u_{p,i})^2 + (v - v_{p,i})^2 + (w - w_{p,i})^2}$$

– модуль разностного вектора; u, v, w – компоненты вектора скорости ветра \mathbf{v} ; $v_{p,i}, u_{p,i}, w_{p,i}$ – компоненты вектора скорости капель i -й фракции; ρ – плотность воздуха; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Для коэффициента аэродинамического сопротивления использовалась формула Клячко [16]:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}}}, \quad (6)$$

где

$$\text{Re} = \frac{2\rho |\mathbf{v} - \mathbf{v}_p| r}{\mu}$$

– число Рейнольдса относительного движения; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Зависимость (6) справедлива в диапазоне $\text{Re} = 1 \div 700$ (промежуточный режим обтекания), для диапазона $\text{Re} = 700 \div 3 \cdot 10^5$ (автомодельный режим обтекания) использовалось значение $C_D = 0,44$ [10, 15].

Скорость гравитационного осаждения капель w_{p0} определялась из решения уравнения (3), которое при $d\mathbf{v}_{p,i}/dt = 0$ сводится к трансцендентному уравнению.

В табл. 2 приведены результаты расчета скорости стационарного осаждения капель воды и соответствующие экспериментальные данные по скорости дождевых капель [12–14].

Здесь же приведены расчетные значения чисел Рейнольдса и Вебера

$$\text{We} = (2\rho |\mathbf{v} - \mathbf{v}_p|^2 r) / \sigma,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с опытными данными по скорости капель, что свидетельствует об адекватности используемых в модели зависимостей.

Для учета аэродинамического разрушения капель предполагалось, что при достижении критического значения числа Вебера $\text{We} = \text{We}_* = 17$ капля дробится на две сферические равной массы.

Учет влияния вертикальной координаты на физические свойства воздуха проведен по параметрам стандартной атмосферы [17], при этом расчет коэффициента динамической вязкости проводился по формуле Сатерленда

$$\mu = \frac{0,68 \cdot 10^{-2}}{T + 122} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2},$$

где T – абсолютная температура воздуха; $[\mu] = \text{Па} \cdot \text{с}$. Погрешность расчета μ по этой формуле не превышает 0,5% в диапазоне температур 180–1400 К [18].

Поскольку при движении капель в разных слоях атмосферы происходит их теплообмен с окружающей средой, то для расчета температуры капли T_p использовалось уравнение теплового баланса в виде

$$\frac{dT_{p,i}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{r_i^2 \rho_p c_p} \text{Nu} (T - T_{p,i}), \quad (7)$$

где c_p – удельная теплоемкость жидкости; λ – коэффициент теплопроводности газа; $T_{p,i}$ – температура капли i -й фракции (усредненная по ее объему).

Для расчета числа Нуссельта использовали зависимость [19]:

$$\text{Nu} = 2,0 + 0,56 \sqrt{\text{Re}}. \quad (8)$$

Таблица 2

Параметры стационарного осаждения капель

r , мм	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
w , м/с	0,046	0,24	0,69	1,59	3,88	7,08	8,60	9,93	11,10	12,16
Re	0,12	1,63	9,26	42,4	258	943	1719	2645	3696	4859
We	$1,4 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	0,002	0,017	0,25	1,6	3,7	6,5	10,2	14,7
w , м/с (эксп.)	0,05	0,27	0,72	1,62	4,03	6,49	8,06	8,83	9,09	9,18

Уравнение для изменения радиуса капли за счет испарения имеет вид

$$\frac{dr_i}{dt} = -\frac{G_i}{4\pi\rho_p r_i^2}. \quad (9)$$

Скорость испарения определяется по формуле

$$G_i = 4\pi r_i k^2 \frac{X}{1-X},$$

где k – коэффициент массоотдачи; X – мольная доля пара вещества капли вблизи ее поверхности.

Выражая X через парциальное давление пара p_0 , уравнение (9) можно представить в виде

$$\frac{dr_i}{dt} = -\frac{k}{\rho_p} \frac{p_0}{p - p_0}, \quad (10)$$

где p – давление окружающей среды.

Коэффициент массоотдачи рассчитывается по критериальной зависимости [20]:

$$k = \frac{\rho_f D_f}{2r} \left[2 + 0,6 \left(\frac{2r|\mathbf{v} - \mathbf{v}_p| \rho_f}{\mu_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_f}{\rho_f D_f} \right)^{1/3} \right], \quad (11)$$

где D_f – коэффициент бинарной диффузии при пленочной температуре $T_f = (T_p + T)/2$; ρ_f , μ_f – плотность и коэффициент динамической вязкости воздуха при T_f .

В литературе описан целый ряд методов расчета коэффициента диффузии в бинарных газовых системах при низких давлениях [19], однако наиболее точным из них является метод Фуллера–Шлеттера–Гиддингса, поскольку базируется на большом количестве опытных данных [20]. Эмпирическая корреляция имеет вид

$$D = \frac{T^{1,75} [(M_A + M_B)/(M_A M_B)]^{0,5}}{p [(\Sigma V_A)^{1/3} + (\Sigma V_B)^{1/3}]^2}, \quad (12)$$

где D выражена в $\text{см}^2/\text{с}$; p – в атмосферах; T – в кельвинах; M_A и M_B – молекулярные массы компонентов A и B (капель жидкости и воздуха); ΣV_A , ΣV_B – диффузионные объемы молекул.

Значения диффузионных объемов молекул для разных веществ приведены в [20]. С помощью уравнения (12) были получены формулы для расчета коэффициентов диффузии в воздухе капель воды и компонентов жидких ракетных топлив в виде

$$D = \frac{B \left(\frac{T}{273} \right)^{1,75}}{p}, \quad (13)$$

где значения $B = 0,22$ (вода); $0,148$ (азотная кислота); $1,22$ (керосин); $0,9$ (НДМГ).

Для расчета траекторий движения капель к системе уравнений необходимо присоединить кинематические соотношения:

$$\frac{dx}{dt} = u_p, \quad \frac{dy}{dt} = v_p, \quad \frac{dz}{dt} = w_p. \quad (14)$$

Данная система после подстановки в нее значений компонент скорости ветра u , v , w интегрируется численно. Для ее интегрирования использовалась эффективная неявная разностная схема, предложенная в [15].

Система уравнений (4)–(14) описывает движение центра масс капель i -й фракции с учетом испарения, аэродинамического дробления и ветрового сноса. Для ее решения необходимо задать начальные условия (распределение капель по размерам, размер первичного облака, начальную скорость капель, высоту разгерметизации, концентрацию капель), а также базу данных по параметрам атмосферы и скорости ветра на разных высотах.

Для определения характеристик рассеяния капель в атмосфере за счет турбулентной диффузии использовался комбинированный эйлерово-лагранжев подход [15, 21], в соответствии с которым для каждой фракции капель решалось уравнение турбулентной диффузии

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c_{m,i}}{\partial t} + (u - u_{p,i}) \left(\frac{\partial c_{m,i}}{\partial x} \right) + \\ & + (v - v_{p,i}) \left(\frac{\partial c_{m,i}}{\partial y} \right) - (w - w_{p,i}) \left(\frac{\partial c_{m,i}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{t,i} \frac{\partial c_{m,i}}{\partial x} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{t,i} \frac{\partial c_{m,i}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{t,i} \frac{\partial c_{m,i}}{\partial z} \right) - \frac{c_{m,i} G_i}{m_i}, \quad (15) \end{aligned}$$

где $D_{t,i}$ – коэффициент турбулентной диффузии капель i -й фракции.

В уравнении (15) система координат связана с центром масс i -й фракции капель. Коэффициент турбулентной диффузии капель определялся в соответствии с эмпирической формулой [22]:

$$D_{t,i} = D_t \exp[-(r_i/r_m)^2],$$

где коэффициент турбулентной диффузии D_t и краевые условия в уравнении (15) определены в соответствии с рекомендациями [21]. Уравнения (15) решались численным методом контрольного объема [25]. По рассчитанным распределениям массовой концентрации капель $c_{m,i}(x, y, z)$ и параметрам первичного облака капель можно определить топологию распространения облака токсичных компонентов вплоть до осаждения на земную поверхность.

Физические характеристики типичных компонентов жидких ракетных топлив, необходимые для расчета эволюции облака капель (по данным [23, 24]), приведены в табл. 3.

Таблица 3
Физические характеристики компонентов при $T = 20$ °С

Компонент	$T_{\text{кип}},$ °С	$T_{\text{плав}},$ °С	$\sigma,$ Н/М	$\rho_p,$ г/см ³
Вода	100	0	$72,53 \cdot 10^{-3}$	1
Керосин	147	-63	$24,0 \cdot 10^{-3}$	0,79
Азотная кислота	84	-42	$59,0 \cdot 10^{-3}$	1,51
Азотный тетраксид	21	-11	$26,2 \cdot 10^{-3}$	1,45
НДМГ	63	-58	$28,0 \cdot 10^{-3}$	0,79

Для учета температурной зависимости ρ_p , σ использовались аппроксимационные зависимости, приведенные в [1, 2].

В качестве параметра реализации разработанной физико-математической модели были проведены расчеты траекторий полидисперсных капель НДМГ при значении высоты разгерметизации $H = 18$ км для двух вариантов состояния атмосферы, приведенных в табл. 4 (г. Новосибирск, Колпашево, 1.07.2001 г.).

Таблица 4
Состояние атмосферы по данным метеостанций на 1.07.2001 г.

Высота, км	Направление, град	$ v $, м/с	T , °C
<i>г. Новосибирск</i>			
0	145	3	8
0,78	145	3	8
1,47	150	1	3
3,01	245	7	-7
5,60	260	15	-18
7,23	260	25	-30
9,21	275	36	-42
11,93	270	21	-43
13,87	275	16	-44
16,56	250	6	-48
18,00	260	32	-45
<i>г. Колпашево</i>			
0	335	4	6
0,78	335	4	6
1,47	320	5	0
3,01	260	7	-7
5,60	225	10	-23
7,23	230	15	-35
9,21	220	12	-43
11,93	230	10	-39
13,87	235	8	-42
16,56	220	6	-46
18,00	220	13	-43

Проекции траекторий капель разных фракций на горизонтальную плоскость для этих вариантов приведены на рис. 2, 3. Как видно из графиков, капли могут рассенываться на значительные расстояния (свыше 20 км) от координаты точки выброса топлива.

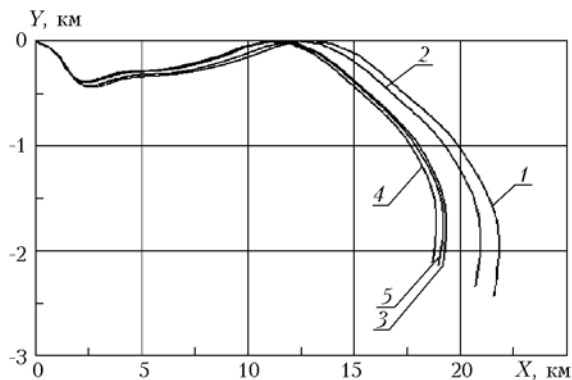


Рис. 2. Проекция траекторий частиц разных фракций на горизонтальную плоскость ($H = 18$ км, г. Новосибирск):
1 - $r = 1,5$; 2 - 2,5; 3 - 3,5; 4 - 4,5; 5 - 5,5 мкм

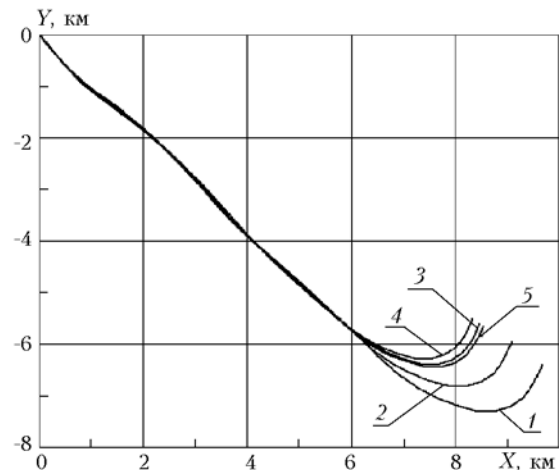


Рис. 3. Проекция траекторий частиц разных фракций на горизонтальную плоскость ($H = 18$ км, г. Колпашево):
1 - $r = 1,5$; 2 - 2,5; 3 - 3,5; 4 - 4,5; 5 - 5,5 мкм

Выводы

В статье представлена физико-математическая модель эволюции облака токсичных жидко-капельных компонентов при выбросе жидких ракетных топлив в атмосферу.

Данная модель учитывает полидисперсность образующихся капель, нестационарность движения капель, процессы их нагрева и охлаждения, фазовые переходы, турбулентную диффузию и влияние преобладающего ветра на топологию загрязнения местности.

Сравнение результатов тестовых расчетов с имеющимися данными для дождевых капель позволяет сделать выводы об адекватности модели.

Для повышения точности прогнозирования экологических последствий при выбросе жидких ракетных топлив в атмосферу необходимо уточнение размеров первичного облака капель, а также учет гравитационной коагуляции при столкновениях капель разных фракций.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 02-01-01246) и Минобразования РФ (проект E02-12.3-108).

1. Александров Э.Л. О поведении капель ракетного топлива в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 4. С. 36-45.
2. Александров Э.Л. Поведение жидких ракетных топлив в атмосфере // Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду: Справочное пособие / Под ред. В.В. Алдушина, С.И. Козлова, А.В. Петрова М.: АНКИЛ, 2000. 600 с.
3. Садовский А.П., Ратуна В.Ф., Олькин С.Е., Зыков С.В., Резникова И.К. К вопросу об аэрозольро-вании гептила в районах падения отделяемых частей ракет-носителей // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 6-7. С. 672-677.
4. Ратуна В.Ф., Садовский А.П., Олькин С.Е., Зыков С.В., Резникова И.К., Смирнова А.И. Оценка характеристик выпадений ракетного топлива по его содержанию в озерной воде // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 1. С. 80-83.

5. *Архипов В.А., Березиков А.П., Козлов Е.А., Трофимов В.Ф.* Моделирование процессов образования и эволюции жидкокапельного облака при разгерметизации в атмосфере топливных баков ракет // Докл. техн. конф. «Проблемные вопросы методологии утилизации смесевых твердых ракетных топлив, отходов и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники». Бийск, 2000. С. 81–95.
6. *Березиков А.П., Копцева Е.Ю., Шереметьева У.М.* Образование и эволюция жидкокапельных токсичных компонентов при авариях ракет-носителей // Исследование по баллистике и смежным вопросам механики. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. С. 8–9.
7. *Arkhipov V.A., Berezikov A.P., Kozlov E.A., Tkachenko A.S., Trofimov V.F.* Evolution of Liquid-Drop Cloud at Accidents of Liquid-Propellant Rockets // Combustion and Atmospheric Pollution (Semenov Memorial). М.: TORUS PRESS Ltd., 2003. P. 626–630.
8. *Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Шаманаев В.С.* Самолетные исследования аэрозольного следа от отделяемых частей ракеты носителя // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1137–1140.
9. *Колмогоров А.Н.* О логарифмически нормальном законе распределения частиц // Докл. АН СССР. 1941. Т. 31. № 2. С. 99–101.
10. *Островский Г.М.* Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. 359 с.
11. *Архипов В.А., Бондарчук С.С.* Формулы связи параметров унимодальных распределений частиц по размерам с геометрическими характеристиками функций плотности вероятности // Механика быстротекающих процессов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989. С. 83–92.
12. *Тверской П.Н.* Курс метеорологии (физика атмосферы). Л.: Гидрометеониздат, 1962. 700 с.
13. *Матвеев А.Т.* Основы общей метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1965. 874 с.
14. *Александров Э.Л.* О скорости падения капель осадков // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1990. Т. 26. № 8. С. 878–880.
15. *Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф.* Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. 286 с.
16. *Клячко Л.С.* Уравнение движения пылевых частиц в пылеприемных устройствах // Отопление и вентиляция. 1934. № 4. С. 27–29.
17. *Атмосфера* стандартная. ГОСТ 4401-81. М.: Изд-во стандартов, 1981. 180 с.
18. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
19. *Аггарвол С.К., Тонг А.И., Сириньяно В.А.* Сравнение различных методов расчета испарения капель // Аэрокосмическая техника. 1985. Т. 3. № 7. С. 12–24.
20. *Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е.* Явления переноса. М.: Химия, 1974. 688 с.
21. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 448 с.
22. *Dieck J., Neesse Th.* Contribution to Analysis of Energy Spectrum and Transport Phenomena in a Turbulent Two-Phase Flow // The eight Beer – Shiva Conference. Israel, Jerusalem, 1996. P. 108.
23. *Зрелов В.Н., Серегин Е.П.* Жидкие ракетные топлива. М.: Химия, 1975. 320 с.
24. *Краткий справочник химика* / Под ред. Б.В. Некрасова. М.: Госхимиздат, 1956. 560 с.
25. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

V.A. Arkhipov, A.P. Berezikov, E.A. Kozlov, O.V. Matvienko, A.S. Tkachenko, V.F. Trofimov, U.M. Sheremetyeva. **Modeling of aerosol cloud expansion accompanying the liquid rocket fuel ejection into the atmosphere.**

The physical-mathematical model of evolution of toxic components of a liquid rocket fuel cloud during attending crashes and carrier rocket stages division is developed taking into account the polydispersity of droplets, their motion instability and the characteristics of dominant wind. This model takes into account a process of droplets heating and freezing in the different atmospheric layers, processes of phase change, aerodynamical splitting and turbulent diffusion. Some results calculated for typical liquid rocket fuel components are presented.