

УДК 629.76+662.61.8:551.5

## Прикладные аспекты экологии при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники

В.А. Архипов<sup>1,2</sup>, И.К. Жарова<sup>1</sup>, Е.А. Козлов<sup>1</sup>, А.С. Ткаченко<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН  
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1

<sup>3</sup>Томский государственный педагогический университет  
634041, г. Томск, ул. Киевская, 60

Поступила в редакцию 18.02.2013 г.

Обсуждаются экологические проблемы эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники. Представлены результаты математического моделирования термогазодинамических процессов в жидкокапельных средах, загрязняющих атмосферу при падении отработанных ступеней ракет-носителей и при аварийном сбросе авиационного топлива.

*Ключевые слова:* экология, атмосфера, ракеты-носители, авиационное топливо, токсичные компоненты; ecology, atmosphere, carrier-rocket, aviation fuel, toxic components.

### Введение

Необходимость оценок экологических рисков, их расчетного прогноза приобретает все большее значение в связи с интенсификацией космической деятельности, и в ближайшем будущем потребность в осуществлении надежных оценок последствий реализации различных аспектов будет только возрастать. Космические технологии дают старт широкому спектру технологий гражданского назначения, новым техническим направлениям и индустриям.

Присутствие в космосе является своеобразным оборонным щитом с точки зрения геополитических интересов любого государства, обладающего современной качественной связью, навигацией, геонформационными технологиями и возможностями космической разведки. Количество космодромов в мире увеличивается с каждым десятилетием, и сегодня с учетом строящихся их насчитывается более 30. Территориально космодромы рассредоточены по всем континентам, кроме Антарктиды. Несомненно, такая широкая сеть космодромов создает риски негативного воздействия на окружающую среду при запуске ракет-носителей и, следовательно, вызывает необходимость количественно-качественной оценки рисков. К рискам, требующим особого внимания,

относятся, в первую очередь, химические загрязнения атмосферы и почвы, загрязнение поверхностных и грунтовых вод. Анализ известных статистических данных, в частности для России, показывает следующее.

В 2011 г. в России осуществлены запуски девяти ракет-носителей «Протон-М», шести — «Союз-У», пяти — «Зенит», пяти — «Союз-2.1б», четырех — «Союз-ФГ», четырех — «Союз-2.1а», одной — «Рокот» и одной — «Днепр». Ракеты-носители «Протон-М» (стартовый вес 698 т) и «Днепр» (стартовая масса 210 т) заправляются высокотоксичными компонентами — несимметричный диметилгидразин (гептил) и азотный тетраоксид (АТ) в смеси с азотной кислотой. Остальные ракеты (со стартовой массой от 100 до 450 т) заправляются керосином.

С технической точки зрения керосин считается малотоксичным, однако для жизнедеятельности достаточно вреден. Суммарно при вышеперечисленных запусках высокотоксичные компоненты заправки ракет составили 43%; малотоксичные — 57%. Если учесть, что компоненты горючего и окислителя составляют около 90% стартовой массы, то становится очевидным, что суммарный вклад токсикантов чрезвычайно весом и источником наибольшей опасности с точки зрения химического воздействия на окружающую среду являются высокотоксичные компоненты — гептил и АТ. В связи с этим одним из наиболее важных аспектов при оценке является методология оценки потенциальной экологической опасности для районов падения отдельных ступеней ракет-носителей.

\* Владимир Афанасьевич Архипов; Ирина Константиновна Жарова (zharova@niipmm.tsu.ru); Евгений Александрович Козлов; Алексей Степанович Ткаченко (atka@sibmail.com).

Непосредственной экологической угрозой является наличие в баках и трубопроводах отделенных ступеней остатков так называемого «гарантийного» запаса компонентов, которые при падении представляют экологическую угрозу. Разработка методологии прогнозирования экологической обстановки в районах падения отработанных фрагментов является актуальной не только для районов Западной Сибири, Горного Алтая и Саян, где отведены «зоны отчуждения» при падении, но и для других регионов мира.

Главные вопросы, на которые методология с большой степенью достоверности должна давать ответы: где выпадут токсичные компоненты? в каком количестве? какова степень экологической угрозы? На эти вопросы теоретические исследования многих авторов [1–6] дают ответы только по отдельным факторам, явлениям и процессам и направлены, в основном, на разработку фундаментальных основ прогнозирования в виде физико-математических моделей и диапазонов их применимости. Авторы настоящей работы считают, что этого недостаточно для решения прикладных задач.

В настоящей статье дан анализ подходов к комплексному моделированию прогнозирования рисков, связанных с определением места выпадения, степени зараженности конкретных территорий на основе компьютерного моделирования с учетом всех возможных процессов, факторов, физических и метеорологических явлений.

## **Основные положения методологии исследования**

Сформулированная прикладная задача является многофакторной и весьма сложной. Основной трудностью при разработке проблемно-ориентированного программного комплекса и заложенных в нем физико-математических моделей, а также при прогнозе возможного развития событий является неопределенность:

1) количества компонентов, оставшихся на борту в момент отделения, что приводит к неточности в количественных оценках начального облака заражения при разгерметизации. При вращении на траектории спуска отделенного блока жидкость в баках ведет себя сложным образом – жгутуруется и совершает удары по днищам как твердое тело, что приводит к неопределенности в оценке высоты нарушения целостности. Дополнительную неопределенность накладывает разогрев вращающегося блока, летящего по баллистической траектории и входящего в плотные слои атмосферы;

2) одновременности (разновременности) разгерметизации баков горючего и окислителя и, как следствие, неопределенность химического взаимодействия и возможного воспламенения компонентов, оказавшихся в атмосфере;

3) диапазона высот и продолжительности разгерметизации и вытеснения компонентов (от мгновенного до нескольких минут);

4) метеоусловий в районах падения отдельных фрагментов и, как следствие, направления и скорости переноса токсичных аэрозолей в атмосфере;

5) характеристик ландшафта и экологической ситуации в зоне падения.

В силу указанных неопределенностей предлагается реализовать в компьютерном виде такую методологию прогнозирования, которая позволяла бы строить различные сценарии развития возможных событий и по построенным сценариям определить максимально возможный спектр вредных для окружающей среды факторов. Принятая методология прогнозирования должна позволять вводить экспертные оценки влияния токсикантов и корректировать итоговый ущерб территорий. Чем большее количество моделей процессов, физических явлений и факторов будет привлекаться к построению сценариев событий и чем адекватнее эти модели реальным процессам, тем точнее возможен итоговый прогноз. Основным требованием к сценариям процессов и математическим моделям является возможность их дополнения и уточнения.

В настоящее время заложены теоретические основы моделирования перечисленных выше процессов. Приведем типичные примеры. В упрощенной постановке, как возможный сценарий, решена задача зажигания смеси компонентов при растекании их по поверхности земли вследствие удара, подъема горячих продуктов и увлечения ими несгоревших токсикантов распространения облака под силой ветра. Задача не дает полной картины заражения, однако позволяет определить максимальное расстояние от точки зажигания места выпадения мелких фракций частиц аэрозоля [6]. Решены задачи воспламенения в воздухе жидких компонентов [4], распространения аэрозоля с учетом аэродинамического дробления капель [7], разработана модель эволюции жидкокапельного облака жидкого топлива с учетом испарения частиц [8].

Несмотря на несомненные достижения фундаментальных исследований, имеющие важное значение, в настоящее время отсутствуют разработанные методы прогнозирования загрязнений, позволяющие получить конкретный конечный результат в конкретном районе территории в конкретный момент времени. Таким образом, требования современности выдвигают задачу создания «межотраслевой» методологии, объединяющей смежные области знаний и имеющей прикладное значение. В рамках решения этой масштабной задачи необходимо объединить геоинформационные технологии, технологии электронных карт, базы данных по ландшафтным параметрам с учетом наличия рек, водоемов, болот, лесов, пахотных земель и т. д. и физико-математические модели распространения загрязнений всех уровней сложности. Далее, необходимо создание так называемого объемного электронного паспорта территорий, способного обеспечить картографическое сопровождение приземления отделенных ступеней ракет-носителей. Предлагаемая методология представлена на рис. 1 в виде схемы.

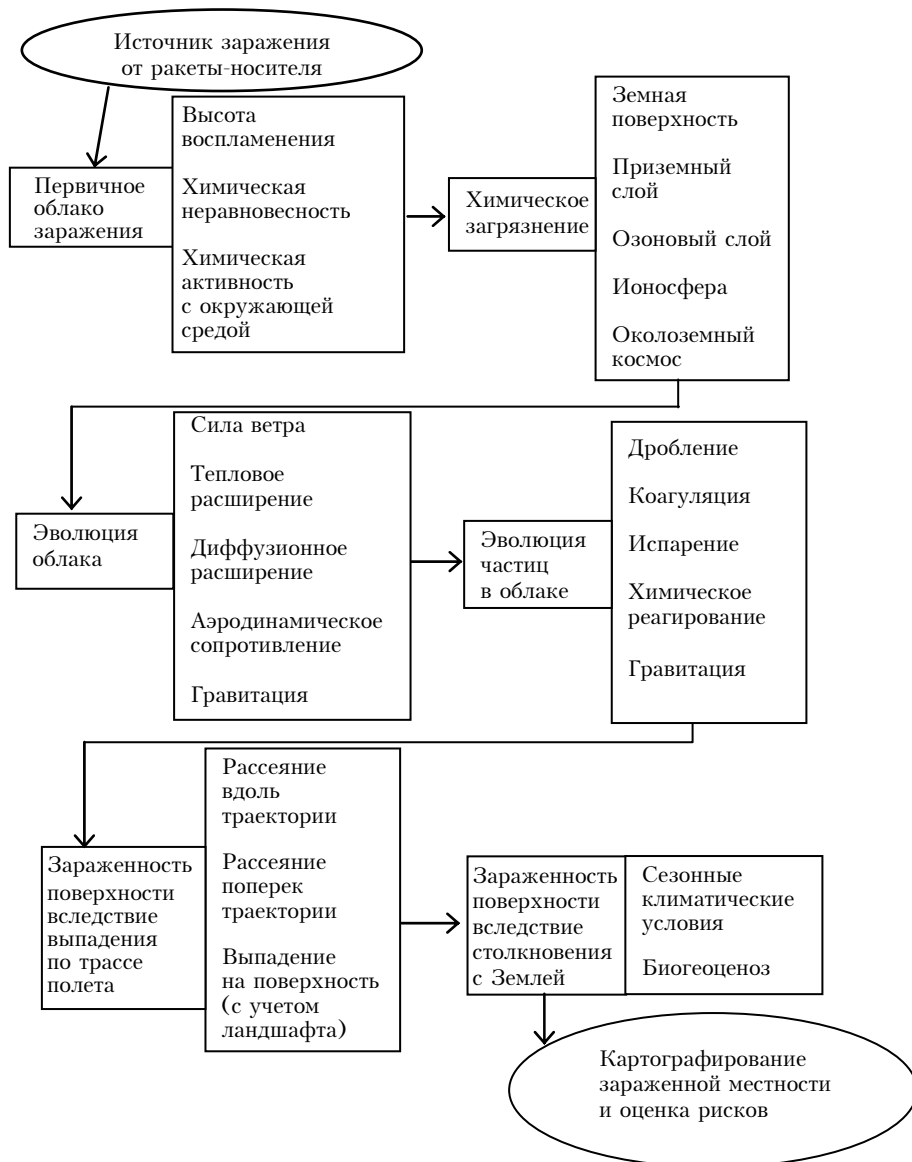


Рис. 1. Схема методологии прогнозирования последствий падения отработанных ступеней ракет-носителей

Для реализации рассмотренной методологии в качестве основы предлагается математическая модель эволюции в атмосфере жидкокапельного облака диспергированных компонентов жидкого топлива с учетом рассеяния, физико-химических превращений, осаждения жидких частиц и их дробления.

Для определения размеров образующихся капель и скорости их гравитационного осаждения необходимо знать физические свойства компонентов — плотность, коэффициент динамической вязкости, коэффициент поверхностного натяжения, а также зависимости этих параметров от температуры. В качестве исходных данных привлекаются функциональные зависимости плотности, температуры, вязкости атмосферы от высоты. Механизм образования капель рассматривается при следующих допущениях [5, 8]:

1) температура на высоте образования облака (высота разгерметизации емкости) выше температу-

ры замерзания жидких компонентов. В случае более низких температур математическая модель уточняется с учетом теплового состояния и динамики твердых (замерзших) частиц;

2) при гравитационном осаждении происходит аэродинамическое дробление массы  $M$  выброшенных жидких компонентов на фрагменты. Образование частиц в виде капель происходит под действием сил поверхностного натяжения при уменьшении по мере возрастания скорости осаждения размера жидких фрагментов до критического.

Учитываются процессы повторного дробления капель. В качестве критерия дробления капель за счет неустойчивости Рэлея–Тейлора принимается критическое значение числа Бонда, за счет неустойчивости Кельвина–Гельмгольца — критическое значение числа Вебера.

Таким образом, минимальный (начальный) размер облака жидкокапельных компонентов опре-

деляется при следующих исходных данных: начальный объем и теплофизические свойства массы  $M$  выброшенной жидкости, начальный размер образующихся капель, а также коэффициент рассеяния капель в пространстве. Отметим, что коэффициент рассеяния является параметром и задается априори, как правило, на основании экспериментальной информации. Кроме того, в случае, если диаметр жидкокапельного облака значительно меньше высоты, на которой оно образовалось, то эволюция облака определяется в первую очередь турбулентной диффузией.

Ввиду того что указанные процессы образования трудно поддаются детерминированному описанию, предлагается использовать функцию массового распределения капель по размерам в виде логарифмически нормального закона распределения. Дальнейшая эволюция облака рассматривается как движение капель каждого  $i$ -го размера с учетом силы ветра, силы тяжести и силы сопротивления. При определении коэффициента аэродинамического сопротивления рассматриваются стоксовский, переходный и автомоделный режимы обтекания капли с учетом зависимости коэффициента вязкости от высоты [9, 10], а также теплообмен капли с окружающей средой и изменение ее размера за счет испарения [11].

Полная система уравнений включает уравнения движения капли, конвективного теплообмена капли с окружающей средой (воздухом) и уравнение, описывающее изменение размера капли вследствие испарения:

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

где  $u_s, v_s, w_s$  — компоненты вектора скорости капли  $\mathbf{U}_s$ ;  $u, v, w$  — компоненты вектора скорости ветра  $\mathbf{U}$ ;  $\phi = \frac{3\rho}{8\rho_s r_s} C_D |\mathbf{U} - \mathbf{U}_s|$ ;  $\rho$  — плотность воздуха;  $\rho_s$  — плотность жидкости;  $C_D$  — коэффициент сопротивления;  $r_s$  — радиус капли;  $g$  — ускорение свободного падения;  $T$  — абсолютная температура воздуха;  $T_s$  — температура капли (осредненная по объему);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха;  $c_p$  — удельная теплоемкость жидкости;  $\text{Nu} = 2 + 0,6\text{Re}^{1/2}\text{Pr}^{1/3}$  — число Нуссельта;  $\text{Re} = 2\rho|\mathbf{U} - \mathbf{U}_s|r_s/\mu$  — число Рейнольдса относительного движения;  $\text{Pr}$  — число Прандтля;  $q_{vap}$  — удельная теплота испарения жидкости;  $m_{vap}$  — масса испарившейся жидкости;  $m_s$  — масса капли;  $k$  — коэффициент массоотдачи;  $p$  — давление окружающей среды;  $p_0$  — парциальное давление пара.

Дробление капель за счет неустойчивости Рэлея–Тейлора или Кельвина–Гельмгольца учитывалось путем расчета значений чисел Бонда:  $\text{Bo} = \rho_s \omega D^2 / \sigma$  ( $\omega$  — ускорение массовых сил,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения), и Вебера:  $\text{We} = 2\rho|\mathbf{U} - \mathbf{U}_s|^2 r_s / \sigma$  [12]. Предполагалось, что при достижении критических значений числа Бонда ( $\text{Bo}^* = 90$ ) или числа Вебера ( $\text{We}^* = 17$ ) капля дробится на две сферические капли равной массы [13].

## Анализ результатов численных исследований

На основании предложенной модели осуществлен численный анализ эволюции облака капель несимметричного диметилгидразина (гептила), образовавшегося при отделении вторых ступеней ракет-носителей «Протон-К» на территории Томской области при пусках с космодрома «Байконур» 26 октября и 26 декабря 2007 г. Параметрические расчеты были проведены при варьировании размеров капель гептила и высоты выброса (разгерметизации топливного бака) с учетом реальных метеорологических условий. На рис. 2 приведены результаты расчетов с использованием аэроклиматических данных метеостанции Колпашево по состоянию на 12:00 (по Гринвичу) 26.10.2007 г. (в скобках указана высота полного испарения). Реальная высота разгерметизации составила 25–35 км. Анализ полученных результатов показал, что в рассмотренных условиях на высотах 2,3–5,5 км капли гептила любых размеров полностью испаряются, не достигая поверхности земли.

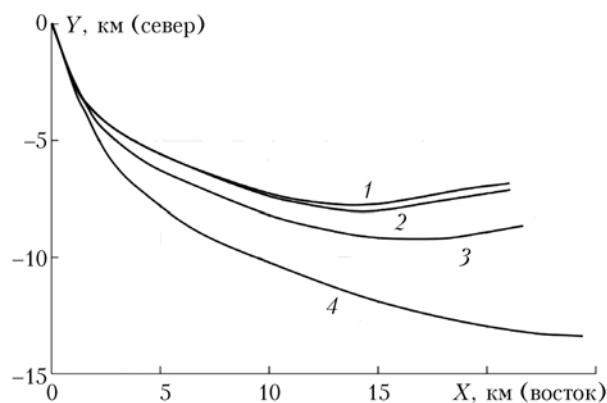


Рис. 2. Проекция траекторий частиц различных начальных радиусов  $r_{p,0} = 2$  мм (2,3 км) — кривая 1; 3 мм (2,6 км) — 2; 1,5 мм (3,7 км) — 3; 1 мм (5,5 км) — 4 на горизонтальную плоскость для пуска ракеты-носителя «Протон-К», 26.10.2007 г.

Аналогичные расчеты проведены для пуска 26.12.2007 г. На рис. 3 приведена скорость испарения капель гептила начального радиуса 3 мм на разных высотах (по оси абсцисс отложена принятая при решении экологических задач и характеризующая степень загрязнения атмосферы на разных высотах величина скорости испарения  $G$  — количество приходящегося на единицу высоты гептила, поступающее в атмосферу в виде пара).

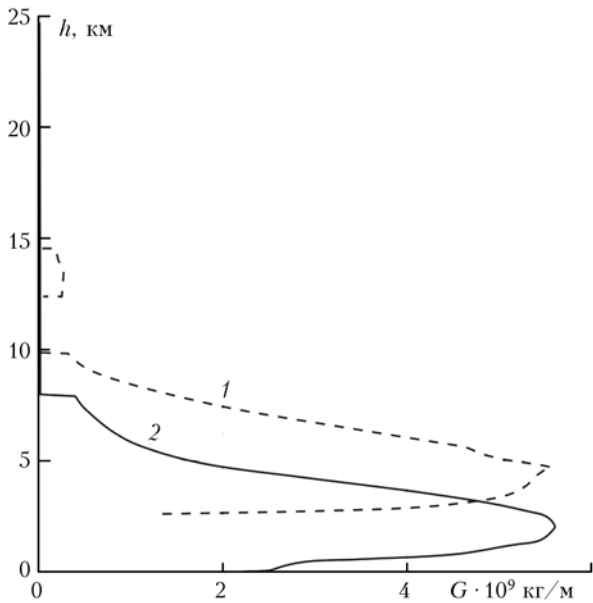


Рис. 3. Скорость испарения капель гептила на разных высотах, 00:00 ч (по Гринвичу): 1 – 26.10.2007 г.; 2 – 26.12.2007 г.

Сравнительный анализ результатов показал, что в отличие от октябрьского пуска в декабре при разгерметизации топливных баков капли гептила крупных размеров достигают поверхности земли. Это объясняется тем, что скорость испарения капель существенно зависит от температуры атмосферы. Как известно, в декабре в районе осадения жидкокапельного облака гептила имеют место значительно более низкие температуры воздуха по сравнению с октябрём, причем не только в верхних слоях атмосферы, но и в тропосфере.

Помимо анализа загрязнения атмосферы высокотоксичными аэрозолями при разгерметизации топливных баков отделяемых ступеней ракетносителей с помощью предложенной математической модели можно прогнозировать негативные последствия аварийных ситуаций при эксплуатации авиационной техники. При нештатных ситуациях, возникающих на борту самолета, для снижения возможных рисков практикуется сброс топлива из запасочных емкостей перед аварийной посадкой.

Для оценки степени загрязнения окружающей среды, минимизации негативных последствий и выбора оптимальной высоты аварийного сброса авиационного топлива с использованием предлагаемой модели проведены расчеты поведения в атмосфере аэрозольного облака капель керосина. Оценивалась высота аварийного сброса  $h_*$ , необходимая для полного испарения капли керосина в условиях Западно-Сибирского региона. Расчеты проводились для разных месяцев при соответствующих осредненных по времени распределениях параметров атмосферы [14].

Для уточнения начальных параметров облака капель в условиях аварийного сброса исходная модель дополнена с учетом того, что сливаемое топливо первоначально попадает в «след» — спутный

поток воздуха со скоростью  $U_f$ , увлекаемый крылом самолета. При этом оценивалась полуширина следа за крылом самолета. Также учитывалось, что дробление капель происходит не мгновенно, а через

$$\text{характерное время [12]} \quad t_* = \frac{2r_s}{|U_f - U_s|} \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^{1/2}.$$

На рис. 4 представлены результаты определения высоты, на которой происходит полное испарение капель керосина в разные месяцы, при скорости самолета 600 км/ч.

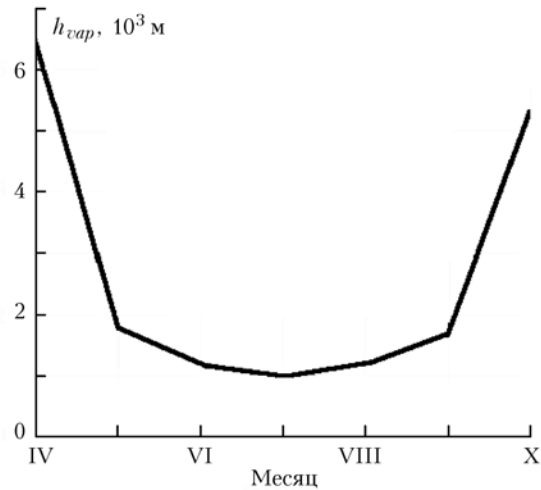


Рис. 4. Высота полного испарения капель керосина в различные месяцы

Отметим, что в холодные месяцы испаряется только часть сброшенного керосина. В табл. 1 приведена доля керосина, испарившегося в холодные месяцы. Видно, что в наиболее холодные месяцы (январь и февраль) около половины сброшенного топлива осаждается на поверхность земли.

Таблица 1

Масса испарившегося керосина в разные месяцы года,  $U_f = 600$  км/ч

Характеристика	Месяц				
	I	II	III	XI	XII
$m_{vap}, \%$	50,9	51,2	73,9	72,3	61,6

Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на скорость движения капли относительно воздуха, является скорость самолета, при которой происходит аварийный сброс топлива. Этот параметр определяет значение числа Вебера, лимитирующего дробление капли за счет аэродинамических сил. При увеличении скорости самолета капли дробятся более интенсивно и, следовательно, быстрее испаряются. Из приведенных в табл. 2 результатов расчетов для осредненного профиля температур и скорости самолета 900 км/ч видно, что по сравнению со сбросом керосина при скорости самолета 600 км/ч полное испарение топлива в относительно теплые месяцы происходит выше над поверхностью земли. При этом в зимние месяцы масса выпавшего на поверхность земли топлива значительно уменьшилась.

Испарение керосина при скорости самолета  $U = 900$  км/ч

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$h_{\text{свп}}, 10^3 \text{ м}$	—	—	4,1	2,0	0,9	0,6	0,4	0,7	0,9	1,9	4,9	—
$m_{\text{свп}}, \%$	78,8	78,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89

### Заключение

Методологический подход, обсуждаемый в настоящей статье, позволяет провести комплексное моделирование возможного риска негативных воздействий на экологию с учетом всех факторов (физико-химические процессы при эволюции облака жидкокапельных аэрозолей, метеорологические условия, особенности ландшафта и т. д.) при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники. Предлагаемый подход является комплексным и требует привлечения современных ресурсов вычислительной техники. Внедрение результатов в инфраструктуры регионов позволит информировать население и правильно оценивать реальные риски. Привязка к конкретной территории и картографическое сопровождение эволюции токсичного аэрозоля в атмосфере, оценка количественных показателей являются значимыми с точки зрения социальной и экономической целесообразности.

1. Александров Э.П. О поведении капель ракетного топлива в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 4. С. 36–45.
2. Александров Э.П. 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. Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Шаманаев В.С. Самолетные исследования аэрозольного следа от отделяемых частей ракет-носителей // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1137–1140.
4. Козлов Е.А., Крайнов А.Ю. Период самовоспламенения двухкомпонентного аэрозоля жидких горючих и окислителя // Физ. горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 15–21.
5. Козлов Е.А., Архипов В.А., Березиков А.П. Опыт исследований внутрикамерных процессов ракетных двигателей применительно к моделированию техногенных загрязнений при отделении ракет-носителей // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН). 2004. № 2 (39). С. 68–73.
6. Козлов Е.А., Халецкая О.В. Разработка математических моделей распространения загрязнений отработанных ступеней ракет-носителей // Докл. техн. конф. «Проблемные вопросы методологии утилизации твердых топлив, остатков жидких топлив в элементах ракетно-космической техники». Бийск, 2000. С. 36–47.
7. Архипов В.А., Березиков А.П., Ткаченко А.С., Усанина А.С. Обобщенная модель распространения жидкокапельного облака при аварийном сбросе авиационного топлива // Изв. вузов. Физ. 2010. № 12/2. С. 10–13.
8. Архипов В.А., Березиков А.П., Козлов Е.А., Трофимов В.Ф. Образование и эволюция жидкокапельных токсичных компонентов при авариях ракет-носителей // II Междунар. симпоз. «Контроль и реабилитация окружающей среды». Томск: СО РАН, 2000. С. 207–209.
9. Клячко Л.С. Уравнение движения пылевых частиц в пылеприемных устройствах // Отопление и вентиляция. 1934. № 4. С. 27–29.
10. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1974. 688 с.
11. Аггарвол С.К., Тонг А.И., Сириньяно В.А. Сравнение различных методов расчета испарения капель // Аэрокосмич. техника. 1985. Т. 3, № 7. С. 12–24.
12. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
13. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазнов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. 364 с.
14. Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР. Т. 1. М.: Гидрометеоздат, 1979. 320 с.

V.A. Arkhipov, I.K. Zharova, E.A. Kozlov, A.S. Tkachenko. **Applied ecology aspects at the use of rocket-space and aviation techniques.**

Ecological problems of the rocket-space and aviation techniques exploitation are discussed. The mathematical modeling results of the thermogasdynamics processes at the liquid-drop medium polluting the atmosphere at separated stages of the rocket carries falling and at the aviation fuel emergency reset are presented.