

УДК 629.76+662.61.8:551.5

Прогнозирование экологических последствий распространения облака токсичных аэрозолей в районах падения отработанных ступеней ракет-носителей

В.А. Архипов¹, И.К. Жарова¹, Е.А. Козлов¹, А.С. Ткаченко^{2*}

¹ *НИИ прикладной математики и механики
Национального исследовательского Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

² *Томский государственный педагогический университет
634041, г. Томск, ул. Киевская, 60*

Поступила в редакцию 10.01.2014 г.

Представлены результаты математического моделирования образования и эволюции облака жидкокапельных аэрозолей при отделении и падении отработанных ступеней ракет-носителей. Обсуждаются экологические проблемы, связанные с загрязнением атмосферы и поверхности Земли токсичными компонентами жидких ракетных топлив в районах падения.

Ключевые слова: экология, атмосфера, ракеты-носители, жидкое ракетное топливо, токсичные компоненты, эволюция жидкокапельного облака, математическое моделирование; ecology, atmosphere, rocket-carrier, liquid rocket fuel, toxic components, evolution of liquid-drop cloud, mathematical modeling.

Введение

При эксплуатации ракет-носителей как средств выведения в космос полезных грузов специальному контролю подлежат районы падения отделяющихся ступеней ракет-носителей. Основной источник экологической угрозы для районов падения и прилегающих к ним территорий — так называемый «гарантийный запас» компонентов жидкого ракетного топлива, поступающих в окружающую среду при падении отделенной ступени ракеты-носителя. Наибольшую экологическую опасность представляют ракеты тяжелого класса типа «Протон». Горючее и окислитель в ракете «Протон» (несимметричный диметилгидразин (гептил) и смесь азотной кислоты с тетраоксидом азота) являются высокотоксичными химическими веществами. Изучение влияния компонентов ракетных топлив на окружающую среду и на здоровье человека является актуальной задачей и находится в сфере постоянного внимания специалистов, обеспечивающих безопасность эксплуатации ракет, и администраций регионов. Контролю загрязнения в районах падения отделяющихся ступеней ракет-носителей подвергаются почва, поверхностные водоемы и растительность. Пробы берутся в строго регламентированные сроки на небольших расстояниях от места приземления фрагментов. Необходимо отметить, что в большинстве случаев пробы на токсичность отри-

цательны. При этом, однако, отмечается рост заболеваемости населения [1]. К рискам, требующим особого внимания, относится в первую очередь химическое загрязнение атмосферы, почвы, 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». Из них «Протон-М» (стартовая масса 698 т), «Днепр» (210 т) и «Рокот» (107 т) заправляются высокотоксичными компонентами — гептилом и азотным тетраоксидом в смеси с азотной кислотой. Остальные ракеты (со стартовой массой от 100 до 450 т) заправляются керосином. Этот компонент считается малотоксичным, однако для жизнедеятельности достаточно вреден. Суммарно при перечисленных запусках высокотоксичные компоненты заправки ракет составили 43%, малотоксичные — 57%. Общее количество токсичных компонентов — более 12 250 т.

В 2012 г. из произведенных в России 29 запусков ракет разных классов осуществлены запуски 11 ракет-носителей «Протон-М» и одной «Рокот». Суммарно при запусках этих ракет высокотоксичные компоненты заправки составили 57,3%, общее количество токсичных компонентов — более 13 500 т.

В 2013 г. в 32 запусках ракет разных классов использованы 10 ракет-носителей «Протон» и две «Днепр». Суммарное количество токсичных компонентов при вышеперечисленных запусках сохранилось на уровне 2012 г.

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

Поскольку отсутствует необходимая приборная база дистанционного и оперативного определения концентраций токсикантов в атмосфере, основными при прогнозировании экологических последствий становятся вопросы математического моделирования динамики и трансформации примесей в атмосфере. При обсуждении проблемы с точки зрения междисциплинарного подхода в совместном научном проекте Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск) и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (г. Новосибирск) еще в 2000 г. вопросы математического моделирования переноса примесей в атмосфере определены как приоритетные [2].

В НИИ ПММ НИ ТГУ вопросам математического моделирования на протяжении последних 15 лет уделяется постоянное внимание. Разработаны математические модели переноса в атмосфере токсичных веществ в виде капель с учетом динамических условий сохранения их целостности, теплообмена и испарения до молекулярного уровня и возможного взаимного влияния указанных процессов [3, 4].

Опыт применения математических моделей к прогнозированию переноса токсикантов при отделении и разрушении отработанных ступеней ракет-носителей приводит к пониманию необходимости разработки сценарного подхода к моделированию. Это связано с наличием большого количества физических неопределенностей процесса диспергирования оставшихся в баках неизрасходованных компонентов топлива. Известным является только тот факт, что на высоте ~30 км свободно падающая с высоты около 150 км отработанная ступень разрушается. Падение отделенной ступени наблюдается как движение огненного шара [5]. Можно предположить, что происходит частичное взаимодействие компонентов горючего и окислителя, так как при контакте они самовоспламеняются. При этом несгоревшие остатки компонентов попадают в атмосферу, дробятся, коагулируют, переносятся ветром, испаряются и могут достигать поверхности Земли в виде капель.

Такого представления процесса для прямого моделирования недостаточно, поскольку для корректного решения необходимо точное задание оставшегося в баках количества компонентов, механизмов поступления их в атмосферу непосредственно из баков, формирования начального облака токсичного аэрозоля, связанного с наличием высокоскоростного следа за облаком и взаимодействием этого следа с окружающей средой, формирования начального размера частиц жидкого компонента и начальных размеров самого облака токсиканта, высоты разрушения, метеоусловий и т.д.

Моделирование эволюции облака капель токсичных компонентов в атмосфере

Адекватным при разработке методологии математического моделирования является сценарный под-

ход, когда из всех предположений выбирается и принимается к математическому описанию сценарий комплексного процесса в виде содержательной модели задачи, не противоречащий физическому смыслу и базирующийся на основных законах механики гетерогенных сред.

Физическая модель основана на следующих положениях [3, 4]. На каплю i -го размера, выброшенную в атмосферу с некоторой начальной скоростью и температурой, действуют силы инерции, аэродинамического сопротивления и сила тяжести. Предполагается, что температура атмосферы на высоте формирования облака (высота разгерметизации емкости) выше температуры замерзания жидких компонентов. В случае более низких температур математическая модель учитывает динамику твердых (замерзших) частиц. При движении капли под действием указанных сил в математической модели предусматривается возможность нарушения целостности капли и ее дробления. Причем процесс дробления может неоднократно повторяться. Условиями, при которых капля дробится, являются критические соотношения, характеризующие взаимодействия двух типов:

а) внутреннее взаимодействие — массовые инерционные силы превалируют над силами поверхностного натяжения капли;

б) внешнее взаимодействие — силы лобового сопротивления превышают силы поверхностного натяжения капли.

Величины всех сил и их соотношений определяются в процессе расчета движения капли в атмосфере. При достижении одного из критических условий капля считается раздробившейся на две одинакового размера, имеющие одинаковые скорости, равные скорости первичной капли. Процесс дробления капли не является мгновенным и осуществляется в соответствии с закономерностями, выявленными на основании специальных экспериментов [6]. Математическая модель дробления капли базируется на классических представлениях о механизмах потери устойчивости жидких капель и структуре следа [7, 8]. Кроме расчета движения и дробления одновременно и в соответствии с режимом обтекания (ламинарный, переходный, турбулентный) рассчитываются коэффициенты сопротивления и теплообмена с окружающей средой и определяется изменение размера капли за счет испарения [9, 10].

Численная реализация модели [3] основана на использовании неявной разностной схемы с переменным шагом интегрирования по времени. Применение устойчивого вычислительного алгоритма с переменным шагом интегрирования позволяет в процессе счета контролировать резкое изменение параметров внешней среды, в частности градиент температуры в тропопauзе, а также изменение параметров капель вследствие дробления.

Расчет движения, теплообмена и испарения капли завершается при полном ее испарении в атмосфере или осаждении на поверхность Земли, фиксируются пространственные или поверхностные координаты. При заданных расходных параметрах исходного жидкого компонента в атмосфере возможен расчет

массовой концентрации аэрозоля в координатах окончания движения капли (пространственных или поверхностных). Математическая модель принятого сценария подробно описана в [3].

Необходимо отметить, что в исходные данные математической модели [3] входят параметры атмосферы — плотность, температура, коэффициент динамической вязкости, направление и скорость ветра в зависимости от высоты. Эти параметры являются задаваемыми и не всегда известны с достаточной точностью для высот разгерметизации ступени ракеты-носителя. В численной реализации в случае их отсутствия необходимые параметры задаются аппроксимационными зависимостями. Наиболее целесообразным представляется комплексный подход анализа экологических рисков при падении ступени ракеты, включающий экспериментальное определение необходимых параметров атмосферы, в том числе в тропопаузе.

Анализ результатов численного моделирования

С использованием предложенной модели проведен численный анализ эволюции облака капель несимметричного диметилгидразина (гептила), образовавшегося при отделении второй ступени ракеты-носителя «Протон-К» 18.12.2012 г. [11] с учетом реальной метеорологической информации (по высоте атмосферы) в районе падения по состоянию на указанную дату. В настоящей статье приведен детальный анализ результатов двух сценариев развития событий.

Задача решалась при следующих условиях: разрушение второй ступени ракеты «Протон» на высоте $H = 35$ км, угол входа к горизонту 12° , скорость движения 4400 м/с, общая масса ступени $14,5$ т, длина 14 м, диаметр 4 м. На модельном уровне реализованы несколько сценариев эволюции жидкокапельного токсичного аэрозоля — «облака» токсикантов — в атмосфере. На рис. 1 представлена схема падения ступени, формирования и трансформации «облака» жидкокапельных токсикантов (штриховой линией обозначена нижняя граница тропопавзы для Западно-Сибирского региона).

На рис. 2 приведены проекции на горизонтальную поверхность траекторий падения капель жидкого топлива (предельные случаи коагуляции и дробления) и отделенной ступени ракеты-носителя. На вынесенном фрагменте показана в увеличенном масштабе проекция траектории падения коагулированной капли (кривая 1). При численном анализе выбранная система координат связана с поверхностью: за начало отсчета (точка $\{x = 0, y = 0\}$) принята проекция точки разгерметизации падающей ступени на поверхность, ось абсцисс направлена вдоль траектории падения ступени (см. рис. 1).

Расчетное удаление ступени в результате ее полета от начальных координат точки разрушения составило ~ 120 км за время движения 66 с (см. рис. 2, кривая 3).

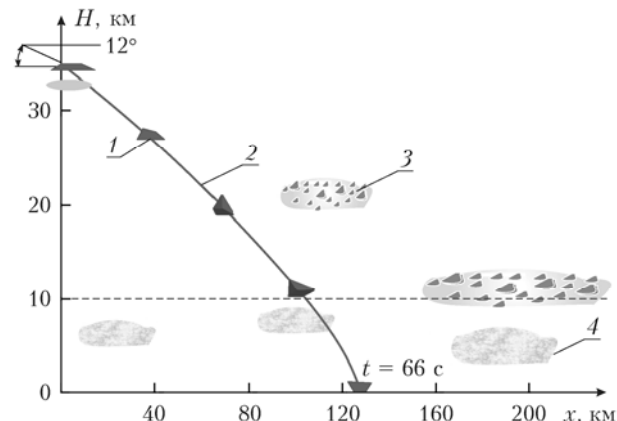


Рис. 1. Схема падения ступени, формирования и трансформации «облака» несгоревших жидкокапельных токсикантов: 1 — падающая ступень; 2 — траектория падения ступени; 3 — «облако» токсикантов; 4 — атмосферное облако

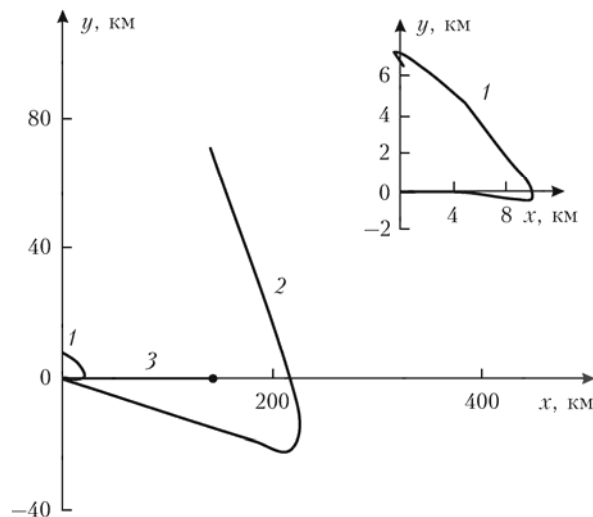


Рис. 2. Проекция траекторий капель гептила с учетом коагуляции (1) и дробления (2) и траектория падения отделенной ступени (3) на поверхность Земли

При рассмотрении предельных сценариев распространения токсикантов получены следующие результаты.

1. При реальной высокой скорости полета (~ 4400 м/с) формируется след. После разгерметизации топливного бака при свободном падении ступени капли разного начального размера (радиус капли r_0), попавшие в след, дробятся до размера $\sim 0,1$ мм и формируется облако капель однородного дисперсного состава. Образовавшиеся капли практически мгновенно отвердевают (замерзают). Далее в процессе падения твердые частицы токсиканта переходят в жидкое состояние (оттаивают) и испаряются в атмосферу на высоте $\sim 8,6$ км. Расстояние до точки конечного испарения составило ~ 200 км (вдоль траектории полета) и отклонилось от траектории в поперечном направлении примерно на 70 км. Время испарения — $6,7$ ч (см. рис. 2, кривая 2).

Результаты численного исследования также показали, что при рассмотренном сценарии развития

событий вследствие испарения на высоте $\sim 8,6$ км в атмосфере формируется облако, насыщенное парами токсиканта, что качественно коррелирует с данными самолетных наблюдений [12]. Задав при разгерметизации начальную массу токсичной жидкости 400 кг, мы провели оценку концентрации C паров токсиканта в образовавшемся облаке. Форма облака моделировалась цилиндром с радиусом основания ~ 1 км и высотой ~ 90 м. Получено, что концентрация токсикантов $C \approx 1,44$ мг/м³.

В настоящее время, согласно Постановлению Министерства здравоохранения РФ от 9 марта 2004 г. № 11 «О введении в действие гигиенических нормативов «Аварийные пределы воздействия (АПВ(Т) а.в.) 1,1-диметилгидразина (НДМГ) в атмосферном воздухе населенных мест», утвержден аварийный предел воздействия гептила в атмосферном воздухе населенных мест. Полученное в рассмотренных условиях значение концентрации токсикантов на три порядка превышает допустимый предел. Можно предположить, что под воздействием внешних факторов (ветер, влажность, температура в соответствующем диапазоне высот) образовавшееся облако токсичного аэрозоля «рассеется» и, следовательно, концентрация гептила в атмосфере снизится до нормального уровня. При этом выпадение гептила на поверхность выделенного для приема падающих фрагментов района не прогнозируется.

2. С учетом возможной коагуляции раздробленных капель радиус частиц составил $\sim 2,7$ мм. Капли такого размера не успевают испариться и осаждаются на поверхность Земли. Длительность «парения» составила ~ 25 мин. Расстояние от точки разгермети-

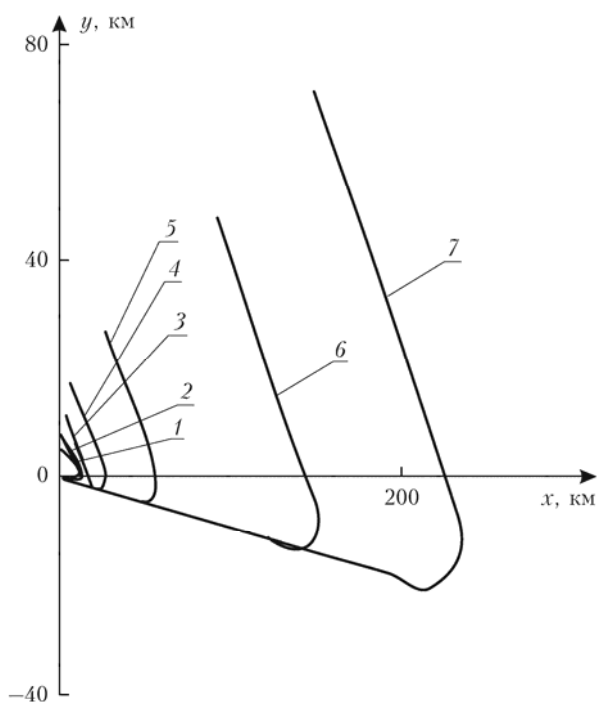


Рис. 3. Проекция траекторий капель гептила разного начального размера на поверхность Земли: 1 – $r_0 = 2,7$; 2 – $r_0 = 2$; 3 – $r_0 = 1$; 4 – $r_0 = 0,5$; 5 – $r_0 = 0,25$; 6 – $r_0 = 0,125$; 7 – $r_0 = 0,09$ мм

зации до точки падения равнялось ~ 7 км (см. рис. 2, кривая 1).

Принимая во внимание неопределенность начального распределения капель по размерам в формирующемся облаке токсикантов, для выявления динамики частиц проведена серия параметрических расчетов при задании различных начальных размеров частиц $r_0 = 0,09; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 2,7$ мм. На рис. 3 представлены проекции траекторий капель на горизонтальную поверхность.

Численно установлено, что крупные капли ($r_0 = 2,7$ мм) выпадают на поверхность в незначительном количестве. Все остальные, более мелкие, капли ($r_0 < 2,7$ мм) испаряются в атмосфере на разных высотах. При этом на основании полученных результатов определено, что размер зоны, содержащей токсичный аэрозоль, (в проекции на поверхность) превышает характерный линейный размер территории, выделенной для приема падающих фрагментов.

Высота и время испарения капель гептила в атмосфере

r_0 , мм	2,7	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,09
h_{vap} , км	0,00	1,60	4,20	6,20	7,80	8,500	8,60
t , ч	0,41	0,44	0,58	0,96	1,80	4,300	6,70

Практический интерес для выделенных районов падения представляет пространственное распределение образовавшегося токсичного аэрозоля. Значения высоты h_{vap} и времени t испарения капель гептила приведены в таблице.

Заключение

1. Разработанная математическая модель [3] учитывает практически все физические эффекты, связанные с образованием и эволюцией облака токсичных аэрозолей при падении отделенной ступени ракеты-носителя.

2. Результаты численного анализа для конкретной ситуации при отделении второй ступени ракеты-носителя «Протон–К» 18.12.2012 г. позволили определить траектории, высоту и время испарения капель гептила.

3. Выявленные закономерности формирования и распространения токсичных аэрозолей в атмосфере показали, что наличие неопределенностей в исходных данных для математического моделирования является одной из основных проблем при оценке экологической обстановки в районах падения отработанных фрагментов.

4. Представляется наиболее целесообразным для повышения точности прогноза экологических последствий использование комплексного подхода, включающего экспериментальное определение необходимых параметров атмосферы при падении ракеты – плотности, температуры, коэффициента динамической вязкости, направления и скорости ветра в зависимости от высоты.

5. Для практического использования в широких масштабах разработанной математической модели [3] в качестве надежного рабочего инструмента в дальнейшем необходимы ее отработка в условиях многовариантных параметрических расчетов, создание подсистемы базы данных с возможностью постоянного пополнения и уточнения и системы обоснованных экспертных оценок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1567).

1. Воробьев С.И., Бурков В.А. Опыт проведения разъяснительной работы среди населения о ракетно-космической деятельности // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 5(24). С. 246–254.
2. Пененко В.В., Панченко М.В. Междисциплинарные исследования переноса и трансформации примесей в атмосфере: предварительные итоги и перспективы // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 694–700.
3. Архипов В.А., Козлов Е.А., Жарова И.К., Ткаченко А.С. Прикладные аспекты экологии при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 636–641.
4. Козлов Е.А., Архипов В.А., Жарова И.К., Ткаченко А.С. Экологические проблемы при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники // Изв. вуз. Физ. 2013. Т. 56, № 9/3. С. 165–168.

5. Бурков В.А. Ракетно-космическая деятельность на территории Томской области // Безопасность жизнедеятельности. 2008. № 1(85). С. 55–56.
6. Шрайбер А.А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники. Серия «Комплексные и специальные разделы механики». Т. 3. М.: ВИНТИ, 1988. С. 3–80.
7. Нугматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
9. Аггарвол С.К., Тонг А.И., Сириньяно В.А. Сравнение различных методов расчета испарения капель // Аэрокосм. техн. 1985. Т. 3, № 7. С. 12–24.
10. Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследование нестационарного испарения капель жидкости // Инженерно-физ. журн. 2010. Т. 83, № 5. С. 829–836.
11. Ткаченко А.С., Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А. Численный анализ динамики и тепломассопереноса при осаждении жидко-капельных аэрозолей в атмосфере: Мат-лы семинара // XIII Всероссийский семинар «Динамика многофазных сред». Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2013. С. 140–142.
12. Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Шаманов В.С. Самолетные исследования аэрозольного следа от отделяемых частей ракет-носителей // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1137–1140.

V.A. Arkhipov, I.K. Zharova, E.A. Kozlov, A.S. Tkachenko. Prediction of ecological consequences of toxic aerosol clouds spreading in the fall areas of waste booster stages.

The results of mathematical modeling of liquid-droplet aerosol cloud formation and evolution at separating and falling of waste booster stages are presented. The ecology problems related to the air and ground pollution by toxic components of liquid rocket fuels in the fall areas are discussed.