

А.М. Адам¹, В.А. Архипов², В.А. Бурков¹, И.Г. Плеханов³, А.С. Ткаченко⁴

Влияние метеорологических условий на распространение аэрозольного облака жидких ракетных топлив

¹ Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, г. Томск

² Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск

³ НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск

⁴ Томский государственный педагогический университет

Поступила в редакцию 13.02.2008 г.

Представлена физико-математическая модель распространения облака жидкокапельных компонентов ракетных топлив в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей, разработанная с учетом реальных метеорологических условий. Проведен анализ результатов расчетов эволюции облака капель несимметричного диметилгидразина, образующегося при отделении вторых ступеней ракет-носителей «Протон-К» на территории Томской области при пусках с космодрома «Байконур» 26 октября и 26 декабря 2007 г.

Территория Томской области используется под районы падения (РП) отделяющихся частей ракет-носителей (ОЧРН) при пусках с космодрома «Байконур» с 1967 г. [1]. Общая площадь 13 районов падения составляет 2,14 млн га (рис. 1). С использованием этих РП с 1967 г. произведено более 260 пусков

ракет-носителей (РН) «Союз», «Зенит», Протон», «Циклон», межконтинентальных баллистических ракет. В 2006 г. проведено пять пусков, в том числе один пуск РН «Протон-К» (рис. 2), компонентом ракетного топлива которой является чрезвычайно токсичный несимметричный диметилгидразин (НДМГ) — «гептил».

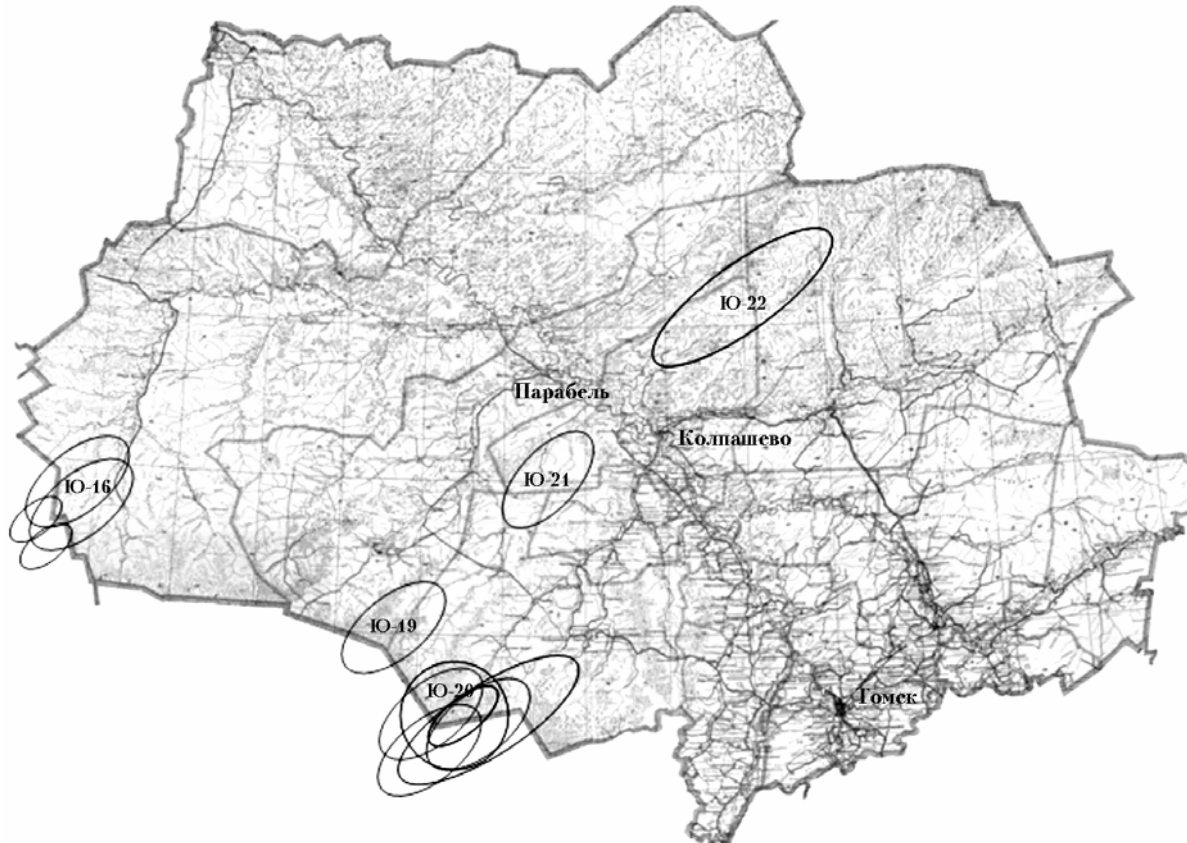


Рис. 1. Районы падения фрагментов ОЧРН на территории Томской области

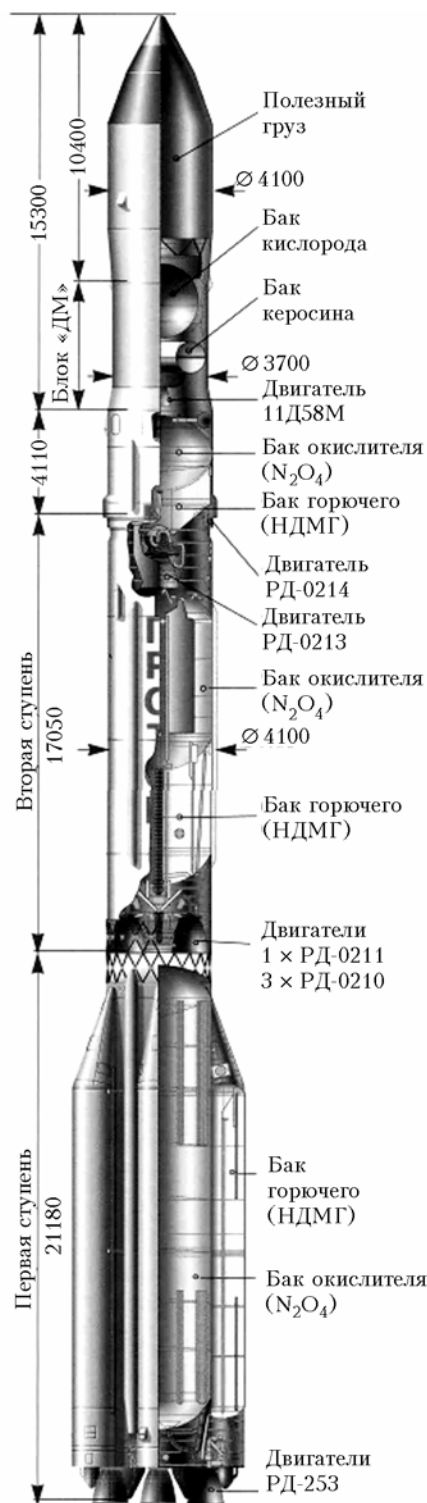


Рис. 2. Ракета-носитель «Протон-К»

В район падения Ю-21 (см. рис. 1) принимает вторую ступень ракеты-носителя, имеющая следующие характеристики:

- компоненты ракетного топлива:
 - окислитель – азотный тетраоксид;
 - горючее – несимметричный диметилгидразин;
- масса ступени с заправленными баками – 167,92 т;

- сухая масса – 11,75 т;
- длина – 17,05 м;
- наибольший поперечный размер – 4,1 м;
- продолжительность работы двигателя – 230 с.

Отработавшая вторая ступень отделяется от РН «Протон-К» через 337 с после старта с космодрома на высоте 155 км, на удалении 590 км от точки старта и имеет скорость 4,3 км/с. После отделения от ракеты ступень продолжает полет по баллистической траектории. Пролетев в безвоздушном пространстве 1200 км, отработавшая вторая ступень входит в плотные слои атмосферы со скоростью 4,5 км/с.

Во время спуска в плотных слоях на вторую ступень действуют интенсивные аэродинамические нагрузки, элементы конструкции ступени нагреваются до 1100 °С, в результате чего на высоте 25–35 км происходит разрушение ступени на отдельные фрагменты, а компоненты ракетного топлива, находящегося в баках (гарантийный запас) и в магистралях, частично сгорают, смешиваясь между собой и набегающим воздушным потоком. Несгоревшее топливо может испаряться, конденсироваться, рассеиваться и, в конечном счете, осаждаться на территорию РП.

Результаты исследований, проведенных лабораторией ОГУ «Облкомприрода» и лабораторией «ЭКО-Вектор» (г. Новосибирск) в районе Ю-21 падения ОЧРН «Протон» при запусках в 2006 г., показали отсутствие гептила в пробах снега (было взято более 20 проб). В то же время не исключено, что за счет турбулентной диффузии и ветровой нагрузки аэрозольное облако токсичных компонентов может при своей эволюции осаждаться в районах, удаленных от РП. Ввиду высокой токсичности НДМГ и его длительного действия важно оценить возможные районы загрязнения. Это можно сделать только с помощью численного расчета с использованием глубоких физико-математических моделей, адекватно описывающих все физические факторы, процессы и явления, сопровождающие распространение аэрозольного облака.

В настоящей статье рассмотрена физико-математическая модель процесса распространения облака капель жидких компонентов ракетного топлива в атмосфере [2, 3] с учетом реальных метеорологических условий, включая распределение температуры воздуха, а также направление и скорость ветра на разных высотах. На каждую каплю облака, выброшенную в атмосферу с некоторой начальной скоростью и температурой, действуют сила тяжести, направленная вертикально вниз, выталкивающая сила Архимеда, направленная вверх, и сила аэродинамического сопротивления при ее движении в атмосфере. Между каплей и окружающим воздухом происходит процесс теплообмена, в результате чего температура капли изменяется во времени. Кроме того, капля испаряется, и при этом уменьшается ее объем. Процесс испарения также вносит свой вклад в теплообмен. В связи с этим к уравнениям движения капли необходимо добавить уравнение теплового баланса и уравнение для изменения размера капли за счет ее испарения.

Без учета силы Архимеда ввиду ее малости уравнения движения капли радиусом r_p в проекциях на оси декартовой системы координат x , y , z (ось z направлена по направлению вектора ускорения свободного падения g) имеют вид [4]:

$$\begin{aligned}\frac{du_p}{dt} &= \varphi_1(u - u_p), \\ \frac{dv_p}{dt} &= \varphi_1(v - v_p), \\ \frac{dw_p}{dt} &= \varphi_1(w - w_p) + g.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь

$$\varphi_1 = \frac{3\rho}{8\rho_p r_p} C_D |\mathbf{v} - \mathbf{v}_p|;$$

$$|\mathbf{v} - \mathbf{v}_p| = \sqrt{(u - u_p)^2 + (v - v_p)^2 + (w - w_p)^2};$$

u , v , w — компоненты вектора скорости ветра \mathbf{v} ; u_p , v_p , w_p — компоненты вектора скорости капли \mathbf{v}_p ; ρ — плотность воздуха; ρ_p — плотность жидкости; C_D — коэффициент аэродинамического сопротивления.

Для коэффициента аэродинамического сопротивления использовалась формула Клячко [5]:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}}}, \quad (2)$$

где $\text{Re} = \frac{2\rho|\mathbf{v} - \mathbf{v}_p|r_p}{\mu}$ — число Рейнольдса относительного движения; μ — коэффициент динамической вязкости воздуха.

Зависимость (2) 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 $C_D = 0,44$ [4].

Для учета аэродинамического дробления капель рассчитывались критерии Вебера и Бонда:

$$\text{We} = \frac{2\rho|\mathbf{v} - \mathbf{v}_p|^2 r_p}{\sigma}, \quad \text{Bo} = \frac{4\rho_p |\mathbf{a}| r_p^2}{\sigma},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; \mathbf{a} — вектор ускорения капли.

Предполагалось, что при достижении критического значения числа Вебера $\text{We} = \text{We}_* = 17$ или критического значения числа Бонда $\text{Bo} = \text{Bo}_* = 22,5$ капля дробится на две сферические капли равной массы.

Учет влияния вертикальной координаты на физические свойства воздуха проведен по параметрам стандартной атмосферы [6] и данным метеостанции на конкретную дату запуска, при этом расчет коэффициента динамической вязкости проводился по формуле Сатерленда [7]:

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

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.

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

$$\frac{dT_p}{dt} = \varphi_2 \text{Nu}(T - T_p) - q_{\text{исп}} \frac{G}{mc_p}, \quad (3)$$

где

$$\varphi_2 = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{r_p^2 \rho_p c_p};$$

c_p — удельная теплоемкость жидкости; λ — коэффициент теплопроводности газа; T_p — температура капли (осредненная по ее объему); m — масса капли; G — масса жидкости, испаряющаяся в единицу времени с поверхности капли (скорость испарения); $q_{\text{исп}}$ — удельная теплота испарения жидкости.

Для расчета числа Нуссельта использовали зависимость [8]:

$$\text{Nu} = 2 + 0,6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3},$$

где Pr — число Прандтля.

Уравнение для изменения радиуса капли за счет испарения имеет вид

$$\frac{dr_p}{dt} = - \frac{G}{4\pi\rho_p r_p^2}. \quad (4)$$

Скорость испарения определяется по формуле

$$G = 4\pi r_p^2 k \frac{X}{1 - X}, \quad (5)$$

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

Выражая X через парциальное давление пара p_0 , уравнение (4) можно представить в виде

$$\frac{dr_p}{dt} = - \frac{k}{\rho_p} \frac{p_0}{p - p_0}, \quad (6)$$

где p — давление окружающей среды.

Коэффициент массоотдачи рассчитывается по критериальной зависимости [9]:

$$k = \frac{c_f D_f M_p}{2r_p} \left[2 + 0,6 \left(\frac{2r_p |\mathbf{v} - \mathbf{v}_p| \rho_f}{\mu_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_f}{\rho_f D_f} \right)^{1/3} \right], \quad (7)$$

где D_f — коэффициент бинарной диффузии при пленочной температуре $T_f = (T_p + T)/2$; c_f — суммарная (воздух и пары НДМГ) объемная мольная концентрация при T_f ; ρ_f — суммарная плотность смеси воздуха и паров НДМГ; μ_f — коэффициент динамической вязкости воздуха при T_f .

В литературе описан целый ряд методов расчета коэффициента диффузии в бинарных газовых системах при низких давлениях [9], однако наиболее точным из них является метод Фуллера–Шлеттера–Гиддингса, поскольку базируется на большом количестве опытных данных [10]. Эмпирическая корреляция имеет вид

$$D = \frac{T^{1.75} [(M_A + M_B) / (M_A M_B)]^{0.5}}{p \left[(\sum V_A)^{1/3} + (\sum V_B)^{1/3} \right]^2}, \quad (8)$$

где $[D] = \text{см}^2/\text{с}$; $[p] = \text{атм}$; $[T] = \text{К}$; M_A и M_B – молекулярные массы компонентов A и B (капель жидкости и воздуха); $\sum V_A$, $\sum V_B$ – диффузионные объемы молекул.

Значения диффузионных объемов молекул для разных веществ приведены в [9]. С помощью уравнения (8) были получены расчетные формулы для расчета коэффициента диффузии в воздухе капель НДМГ:

$$D = \frac{0,9}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,75}.$$

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

$$\frac{dx}{dt} = u_p, \quad \frac{dy}{dt} = v_p, \quad \frac{dz}{dt} = w_p. \quad (9)$$

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 [4].

Система уравнений (1)–(8) описывает движение центра масс капель каждой 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. Основные физико-химические характеристики НДМГ по данным [11, 12] приведены в таблице.

Поскольку задача описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, используется численный метод решения. Дифференциальные уравнения заменяются конечно-разностными с использованием неявной по правым частям разностной схемы. Применяется разбиение задачи по физическим процессам. На каждом шаге по времени отдельно рассматриваются три физических процесса. На первом этапе решаются уравнения движения с учетом возможности аэродинамического дробления капли при достижении критических значений чисел Вебера или Бонда, в результате чего определяются новые координаты капли и компоненты ее

вектора скорости. На втором этапе интегрируется уравнение теплообмена и определяется новая температура капли. На третьем этапе определяется изменение радиуса капли и ее массы за счет испарения. Расчет проводится до тех пор, пока вертикальная координата капли не совпадет с поверхностью Земли либо она полностью не испарится.

Основные физические характеристики НДМГ $(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$

Характеристика	Обозначение	Значение
Молекулярная масса	M	60,102
Температура плавления	$T_{\text{пл}}$	$-57,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Температура кипения	$T_{\text{кип}}$	$63,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Критическая температура	T_c	$250 \text{ } ^\circ\text{C}$
Коэффициент поверхностного натяжения	σ	$5,88 \cdot 10^{-2} - 1,157 \cdot 10^{-4} T$, Н/м
Плотность	ρ_p	$[810 - (T_p - 273)]$, кг/м ³
Теплота испарения	$q_{\text{исп}}$	$\frac{RT_c [7,08(1 - T_r)^{0,354} + 4,1172(1 - T_r)^{0,456}]}$, Дж/кг
Газовая постоянная паров	R	$138,339$ Дж/(кг · К)
Плотность насыщенного пара НДМГ	ρ_n	$\frac{0,9643}{T} \exp\left(\frac{16,78T - 3745}{T - 52,27}\right)$, кг/м ³

Примечание. T_r – приведенная температура пленки: $T_r = T_p/T_c$. В аппроксимационных формулах температура берется в кельвинах.

Были проведены параметрические расчеты для различных размеров капель НДМГ, высоты выброса (разгерметизации топливного бака) для реальных метеорологических условий. Реальные аэроклиматические данные на даты конкретных пусков ракет-носителей «Протон-К» были получены из базы данных метеостанции Колпашево.

На рис. 3 приведены результаты расчетов для реального пуска ракеты-носителя «Протон-К», произведенного 26 октября 2007 г. Использованы данные метеостанции Колпашево на 12 ч по Гринвичу в день пуска. Данные зондирования получены только до высоты 23,6 км. Реальная высота разгерметизации 25–35 км. Из рис. 3 видно, что капли любых размеров испарились на высотах от 2,3 до 5,5 км.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 4, относятся к реальному пуску ракеты-носителя «Протон-К», произведенного 26 декабря 2007 г. Эти сутки характеризовались резкими изменениями состояния атмосферы (понижением температуры, изменением направления и силы ветра). В связи с этим были проведены расчеты для трех различных

времен, на которые имелись данные зондирования. Это 00:00 ч по Гринвичу, 12:00 ч по Гринвичу 25 декабря и 00:00 ч по Гринвичу 26 декабря. На рис. 4 цифрами 1, 2 и 3 показаны соответствующие этим временам предполагаемые районы выпадения капель НДМГ.

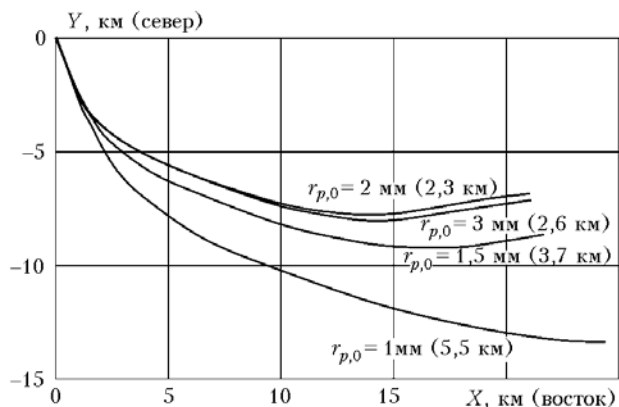


Рис. 3. Проекция траекторий частиц различных начальных радиусов $r_{p,0}$ на горизонтальную плоскость для пуска ракеты-носителя «Протон-К», произведенного 26 октября 2007 г. (в скобках указана высота полного испарения)

Видно, что местоположение района выпадения капель НДМГ определяется в очень большой степени направлением и силой ветра в данный момент времени. Разброс достаточно велик. Реальный район падения (время разгерметизации ступени ориентировочно 00:00 ч московского времени 27 декабря) можно найти интерполяцией по времени между районами 2 и 3 (см. рис. 4).

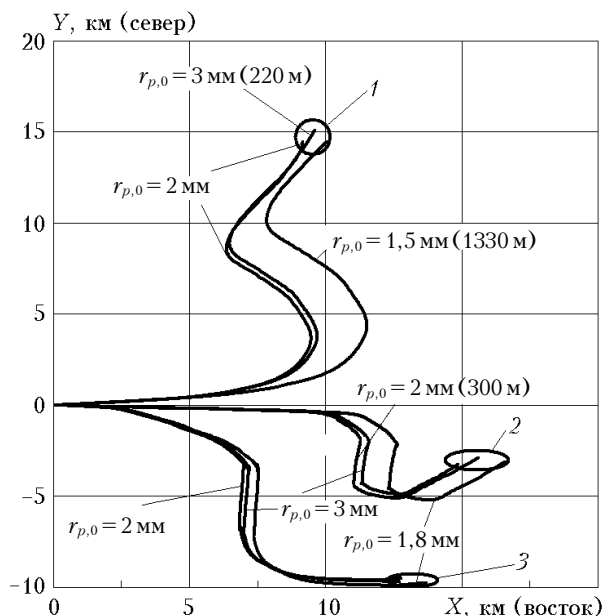


Рис. 4. Проекция траекторий частиц различных начальных радиусов $r_{p,0}$ на горизонтальную плоскость для пуска ракеты-носителя «Протон-К», произведенного 26 декабря 2007 г. (в скобках указана высота полного испарения)

В отличие от октябрьского пуска в декабре капли некоторых размеров достигают поверхности

земли, что объясняется более низкой температурой воздуха в декабре, чем в октябре.

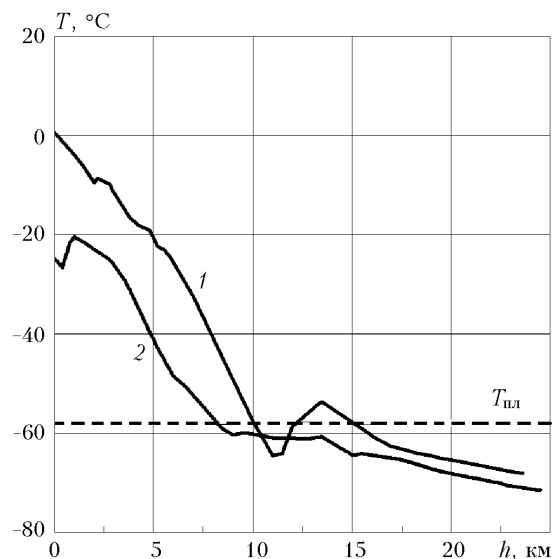


Рис. 5. Распределение температуры атмосферы от высоты: 1 – 26 октября; 2 – 00:00 ч по Гринвичу 26 декабря 2007 г.

Уровень температуры атмосферы определяет, в свою очередь, скорость испарения капель гептила. На рис. 6 приведена скорость испарения капель НДМГ начального радиуса 3 мм на разных высотах. По оси абсцисс отложена величина скорости испарения (кг/м), т.е. количество НДМГ, поступающее в атмосферу в виде пара на единицу высоты. Эта величина характеризует степень загрязнения атмосферы на разных высотах и удобна для решения многих экологических задач. На больших высотах капли практически мгновенно замерзают и не испаряются.

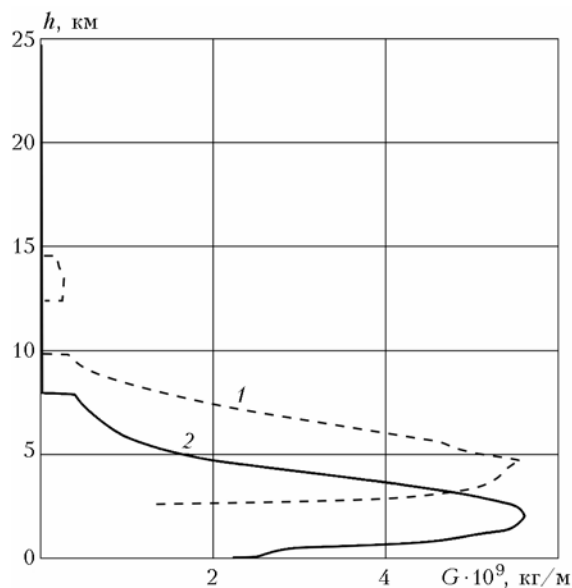


Рис. 6. Скорость испарения капель НДМГ на разных высотах: 1 – 26 октября, 2 – 00:00 ч по Гринвичу 26 декабря 2007 г.

Во время октябрьского пуска на высоте порядка 12,5 ÷ 15 км температура воздуха поднимается выше температуры плавления НДМГ (–57,2 °С) и начинается процесс испарения, затем температура вновь падает, и вторично испарение наблюдается на высотах ниже 10 км. Капли данного начального радиуса (3 мм) полностью испаряются на высоте 2,2 км. Во время декабрьского пуска в связи с более низкими температурами процесс испарения начинается только на высоте около 7,5 км, и капли данного размера не могут испариться полностью и выпадают на поверхность Земли.

Заключение

Таким образом, расчеты показали, что во время октябрьского пуска капли любых размеров испарились на высотах от 2,3 до 5,5 км, а во время пуска в декабре из-за более низких температур интенсивный процесс испарения начинается на более низких высотах и капли некоторых размеров не успевают испариться полностью и выпадают на поверхность Земли. В таких условиях возможно загрязнение территории. Как показали результаты расчетов, определяющим фактором задачи является профиль температуры в тропосфере (ниже 10 км). Кроме того, показано существенное влияние реальных метеоусловий в момент разгерметизации ступени на расположение района выпадения облака. Разработанная модель может использоваться для решения широкого класса задач, связанных с распространением аэрозольных образований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 08-01-99025-р_офи).

1. *Бурков В.А.* Ракетно-космическая деятельность на территории Томской области // Экологический мониторинг: Состояние окружающей среды Томской области в 2006 году. Томск: Графика, 2007. С. 95–97.
2. *Архипов В.А., Березиков А.П., Козлов Е.А., Матвиенко О.В., Ткаченко А.С., Третьяков Н.С., Шереметьева У.М.* Моделирование распространения аэрозольного облака при выбросе жидких ракетных топлив в атмосферу // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 488–493.
3. *Адам А.М., Архипов В.А., Бурков В.А., Плеханов И.Г., Ткаченко А.С.* Влияние испарения капель на распространение аэрозольного облака // Аэрозоли Сибири. XIV рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2007. С. 55.
4. *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. 286 с.
5. *Клячко Л.С.* Уравнения движения пылевых частиц в пылеприемных устройствах // Отопление и вентиляция. 1934. № 4. С. 27–29.
6. *Атмосфера* стандартная. ГОСТ 4401-81. М.: Изд-во стандартов, 1981. 180 с.
7. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
8. *Аггорвол С.К., Тонг А.И., Сириньяно В.А.* Сравнение различных методов расчета испарения капель // Аэрокосмическая техника. 1985. Т. 3. № 7. С. 12–24.
9. *Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е.* Явления переноса. М.: Химия, 1974. 688 с.
10. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982. 591 с.
11. *Сарнер С.* Химия ракетных топлив. М.: Мир, 1969. 488 с.
12. *Александров Э.Л.* О поведении капель ракетного топлива в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 4. С. 36–45.

A.M. Adam, V.A. Arkhipov, V.A. Burkov, I.G. Plekhanov, A.S. Tkachenko. **Influence of meteorologic conditions on the spread of liquid rocket propellant aerosol clouds.**

We present a physical-mathematical model for describing the propagation of liquid-droplet components of rocket propellants in impact areas of launcher separated units. The model was developed with accounting for the real meteorologic conditions. The analysis of calculation results of the evolution of unsymmetrical dimethylhydrazine droplets cloud, formed at the second stages of «Proton-K» launcher separation on the territory of Tomsk region at start-up from the cosmodrome «Baikonur» on October, 26 and December, 26, 2007, is conducted.