

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.522

Ю.Н. Мороков*, Е.Г. Климова*, Г.С. Ривин*, А.И. Бородулин**,
Б.М. Десятков**, С.Р. Сарманаев**, С.В. Зыков**

**Моделирование загрязнения поверхности земли ракетным
ТОПЛИВОМ**

* *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*

** *ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор» Минздрава РФ, Кольцово Новосибирской обл.*

Поступила в редакцию 6.07.2004 г.

Рассматривается процесс падения ансамбля капель несимметричного диметилгидразина (НДМГ), образующихся из остатков топлива при разрушении баков падающих ступеней ракет-носителей. Предполагается, что топливо может вытекать как дискретно (точечный выброс), так и непрерывно вдоль заданной траектории падения ступени. Начальный этап формирования капель не рассматривается, взаимодействие между падающими каплями не учитывается. Рассчитываются траектории падения капель и плотность осаждения НДМГ на поверхность земли с использованием реальных метеорологических данных.

Введение

Среди множества экологически ориентированных проблем Алтае-Саянского региона можно выделить проблему загрязнения районов падения отделяющихся частей ракет-носителей, запускаемых с космодрома Байконур, остатками ракетного топлива. При отделении отработанных ступеней ракет-носителей в их баках остается топливо, количество которого может достигать объема нескольких сотен литров. При входе второй ступени в плотные слои атмосферы на высотах 30–40 км могут происходить разгерметизация баков и попадание ракетного топлива в атмосферу.

Такая ситуация на протяжении уже более 40 лет оказывает неблагоприятное воздействие на население, проживающее в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей. В связи с этим изучение медико-экологических последствий от воздействия остатков ракетного топлива на население ряда районов Алтае-Саянского региона представляет большой практический интерес.

ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор», ГУ НИИ биохимии СО РАН и Институт вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН) в рамках проекта Международного научно-технического центра проводят изучение клинико-эпидемиологических последствий продолжительного воздействия на население указанных выше техногенных факторов окружающей среды. Одной из задач данного проекта является разработка математической модели загрязнения приземного слоя атмосферы и поверхности земли ракетным топливом и продуктами его горения при падении отделяющихся частей ракет-носителей.

Несимметричный диметилгидразин (НДМГ) $N_2H_2(CH_3)_2$ является ракетным горючим, а азотный тетраоксид (АТ) N_2O_4 — окислителем. Такое ракетное топливо обеспечивает удельную тягу ступени, превосходящую почти на 10% характеристики смеси азотной кислоты и керосина и совсем немного уступает по этой характеристике топливу на основе АТ и гидразина [1].

Ракетное топливо на основе НДМГ до сих пор широко используется в отечественной космонавтике. НДМГ является токсичным веществом первого класса опасности, одновременно проявляет канцерогенные и мутагенные свойства и относится к суперэтоксикантам. Для атмосферного воздуха рекомендованное разовое предельно допустимое значение его концентрации составляет $0,001 \text{ мг/м}^3$. НДМГ растворим в воде и легко испаряется, что может привести к загрязнению воздуха, почвы, наземных и подземных вод.

Выброс топлива может происходить вдоль всей траектории падения ступени [2]. Значительная часть топлива, выброшенного на больших высотах, должна испариться на начальном этапе аэродинамического торможения. Доля испарившейся части зависит от скорости ступени в момент выброса топлива, уменьшающейся от 2–3 км/с на высоте 30 км до 0,1 км/с при ударе о землю [2].

Цель данной работы заключалась в построении модели процесса падения капель несимметричного диметилгидразина, образующихся из остатков топлива при разрушении отработавших баков падающих ступеней ракет-носителей. В рамках модели предполагается также учесть особенности пограничного слоя при моделировании осаждения капель на поверхность.

Моделирование процесса формирования ансамбля капель является сложной задачей, и ее решение в настоящий момент не представляется возможным. Поэтому этот процесс нами не рассматривался (так же как и другими авторами [3–5]), и в проведенных расчетах фигурирует лишь та часть топлива, которая остается после завершения формирования капель. Мы рассматриваем такое же, как и в работах [3, 4], экспоненциальное начальное распределение капель по размерам с функцией распределения $f(r) = A \exp(-1,56r)$, где r – радиус капли (мм).

Предполагается, что рассеивание массы топлива в воздухе в процессе падения происходит за счет атмосферной турбулентной диффузии и гравитационного разделения капель разных размеров. Взаимодействие между каплями НДМГ в воздухе не учитывается.

Моделирование падения и испарения капель

Предполагается, что в системе отсчета, в которой локальная средняя скорость ветра равна нулю, капля падает вертикально с установившейся (квазиравновесной) скоростью. При моделировании падения капли ее установившаяся скорость v определяется итерационно на каждом временном шаге с использованием закона Стокса [3, 4, 6]:

$$v = \frac{2\rho g r}{9\mu F/F_s},$$

где ρ – плотность НДМГ; g – ускорение свободного падения; μ – динамическая вязкость воздуха; F/F_s – поправочный множитель:

$$F/F_s = \frac{[1 + \phi(\text{Re})](1 + 0,269\text{We}^{4,7})}{(1 - M^2)^{0,5}};$$

$\text{Re} = 2rv\rho/\mu$ – число Рейнольдса; $\text{We} = rv^2/2\sigma$ – число Вебера; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $M = v/c$ – число Маха; c – скорость звука. Функция $\phi(\text{Re})$ приведена в работах [3, 6].

Масса НДМГ в падающей капле постепенно уменьшается из-за испарения. Этот процесс рассматривается в рамках модели, описанной в [3–5]. Скорость испарения определяется диффузионным отводом молекул НДМГ от капли в атмосферу:

$$\frac{dm}{dt} = -4\pi D r (\rho_n^s - \rho_n^\infty) F_M,$$

где m – масса капли; ρ_n^∞ и ρ_n^s – плотность паров НДМГ в окружающем воздухе и у поверхности капли. Коэффициент диффузии молекул НДМГ в воздухе D рассчитывается по эмпирической формуле, учитывающей поляризацию молекул [5]. Поправочный множитель

$$F_M = 1 + 0,28\text{Sc}^{1/3}\text{Re}^{1/2},$$

где $\text{Sc} = \mu/\rho D$ – число Шмидта.

В отличие от перечисленных выше работ мы рассмотрели также возможное влияние атмосферной влажности на процесс испарения капель. НДМГ гигроскопичен и хорошо смешивается с водой в любых пропорциях [8]. Присутствие воды замедляет процесс испарения НДМГ. Параметры водного раствора НДМГ при произвольных относительных концентрациях $0 < \xi < 1$ в литературе отсутствуют, поэтому мы проводили интерполяцию параметров по их известным предельным значениям при $\xi = 0$ (чистый НДМГ) и $\xi = 1$ (чистая вода). Значения параметров для НДМГ взяты из работ [3–5, 7, 8], а для воды из [9–11]. Несколько формул для расчета свойств воздуха взяты из ГОСТ 4401-81 [12].

Для интерполяции использовались следующие предельные значения (индекс 1 относится к НДМГ, индекс 2 – к воде):

коэффициенты поверхностного натяжения (Н/м):

$$\sigma_1 = 0,0588 - 0,0001157T_s,$$

$$\sigma_2 = 0,0756 - 0,000143(T_s - 273,15),$$

где T_s – температура поверхности капли (К); плотность чистого НДМГ (кг/м³)

$$\rho_1 = 810 + 1,049(273,15 - T_s);$$

плотность насыщающих паров НДМГ (кг/м³)

$$\rho_{n1} = 0,007226 \frac{\exp[(21,33T_s - 3950)/(T_s - 57,49)]}{T_s}.$$

Плотность насыщающих паров воды рассчитывалась по формуле, приведенной в [9]. Удельные теплоты испарения (Дж/кг):

$$\lambda_1 = 583700[(522 - T_s)/224]^{0,36},$$

$$\lambda_2 = 2500000 - 2720(T_s - 273,15).$$

Для оценки теплоты испарения молекул из раствора использовалась информация о типичных энергиях водородных связей О–Н–Н, Н–Н–Н. В силу значительной варибельности этих энергий в разных соединениях подобная оценка является весьма грубой. Для оценки возможного влияния влажности зависимость теплоты испарения молекул НДМГ из водного раствора была принята в виде

$$\tilde{\lambda}_1 = \lambda_1(1,4 - 0,4y_1),$$

где y_1 – объемная доля НДМГ в растворе. При этом теплота испарения молекул воды из раствора

в представленных здесь расчетах считалась не зависящей от y_1 .

Влияние изменения теплоты испарения на давление насыщающих паров учитывалось через экспоненциальный бoльцмановский множитель. Наиболее существенный качественный эффект связан с увеличением теплоты испарения молекул НДМГ при увеличении концентрации молекул воды в растворе, что связано с переходом от водородных связей типа N—H—N к связям типа O—H—N.

Результаты расчетов и выводы

При падении капли испытывают ветровой снос по горизонтали, который для крупных капель, падающих с высоты 30 км, может достигать 30–50 км. При этом из-за атмосферной турбулентности облако капель расплывается. Для пассивной примеси за 30 мин диффузионное смещение может составлять примерно 2 км.

Расчеты показали, что при точечном выбросе положение максимума осаждающегося на поверхность Земли в капельном виде НДМГ определяется падением крупных капель с начальным радиусом 2,0–3,0 мм. При непрерывном вытекании топлива (квазилинейный источник) такие максимумы образуют линию на земной поверхности. При равномерном непрерывном вытекании НДМГ глобальный максимум концентрации НДМГ будет в месте падения ступени, поскольку в этом случае НДМГ не испаряется и не рассеивается из-за турбулентной диффузии.

Для иллюстрации работоспособности модели были проведены пробные расчеты с использовани-

ем телеметрических данных для траектории падения ступени и метеорологических данных для г. Новосибирска на 00 ч среднегринвичского времени 28 апреля 1999 г.

Было рассмотрено 30 точек выброса топлива вдоль траектории падения ступени. Выбросы происходили через 5 с. Последний выброс произведен за 5 с до падения ступени на землю. Для каждого выброса моделировалось падение 14 капель с начальными радиусами от 3,0 до 0,4 мм (с шагом 0,2 мм).

Рассчитанные траектории падения капель, в начале состоявших из чистого НДМГ, представлены на рис. 1 и 2. На рис. 2 также изображены гауссовы распределения выпадающей на землю массы НДМГ, принесенной этими каплями, с учетом испарения капель и рассеивания ансамбля капель за счет атмосферной турбулентной диффузии (в приближении пассивных частиц).

Капли НДМГ, падающие с высоты 30 км с начальным радиусом 3 мм, достигают земли за 28,2 мин, смещаясь на восток на 23,7 км и на юг на 19,0 км. При падении радиус капли уменьшается до 1,56 мм, при этом относительная массовая доля воды в капле составляет 0,2. Таким образом, до земли долетает лишь 11% от начальной массы НДМГ в этой капле.

Капли, падающие с более поздних участков траектории ступени, долетают до земли, имея большие размеры и меньшую относительную долю воды в своем составе. Капли меньшего начального радиуса имеют меньшую скорость падения, большее время испарения и, соответственно, сносятся ветром на большие расстояния.

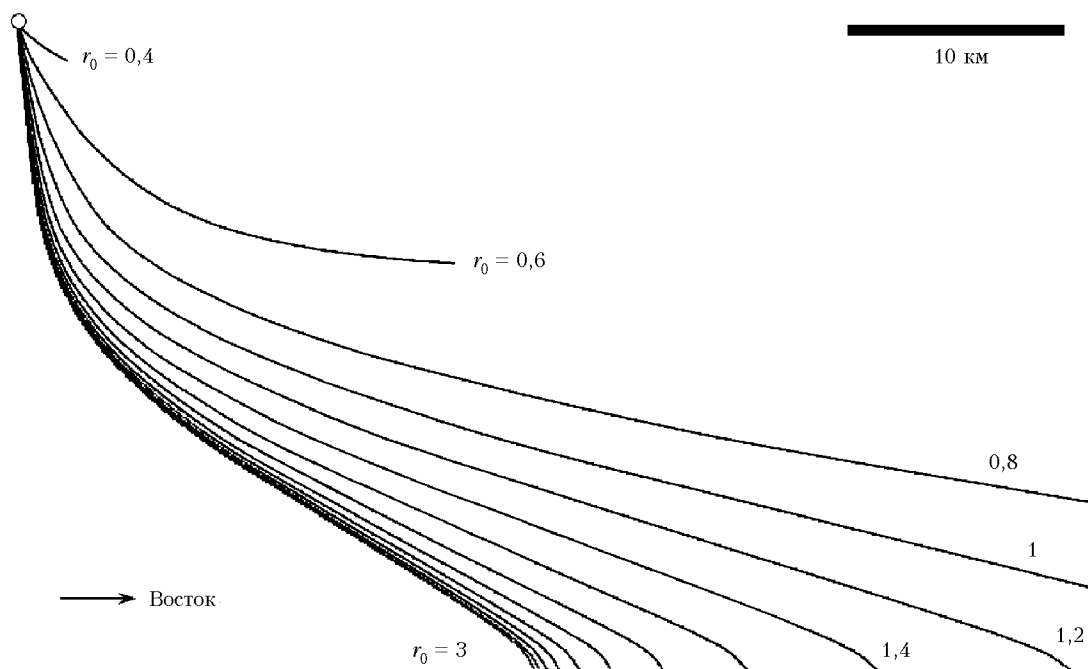


Рис. 1. Траектории падения на землю с высоты 30 км капель разных начальных размеров; r_0 — начальный радиус капли, мм

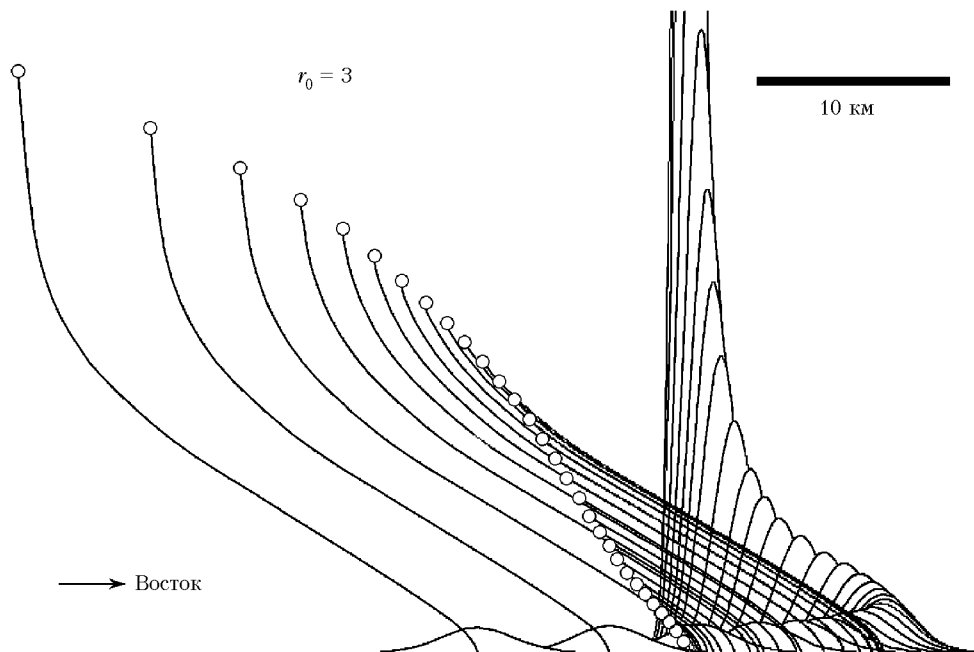


Рис. 2. Траектории падения капель с начальным радиусом 3 мм, выбрасываемых из бака ступени через каждые 5 с. Для каждой капли изображены соответствующие им гауссовы распределения выпавшей на землю массы НДМГ

На рис. 3 и 4 приведены распределения поверхностной плотности НДМГ, выпавшего на землю в виде капель. Результаты, представленные на рис. 3, получены без учета атмосферной влажности.

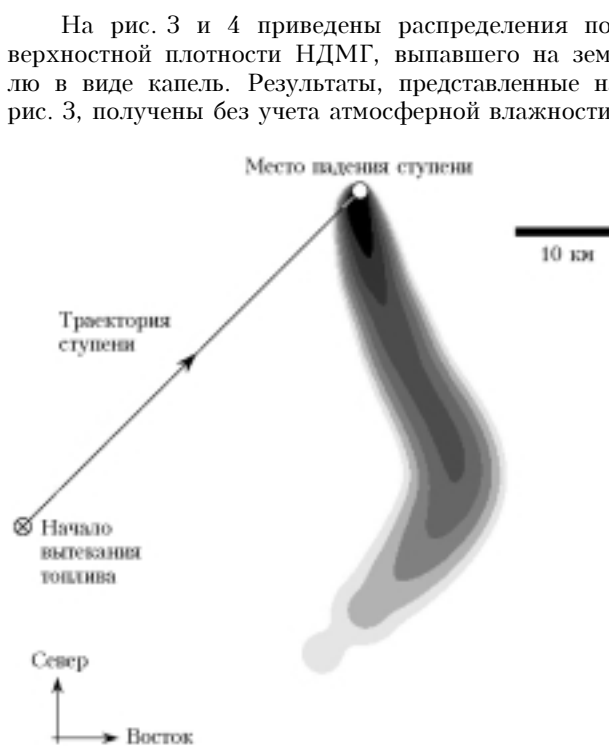


Рис. 3. Распределение плотности достигшего земли НДМГ без учета влажности. Градации цвета соответствуют изменению плотности в четыре раза. При равномерном вытекании до земли долетает 5,2% топлива

Результаты расчетов с учетом влажности приведены на рис. 4. Каждая градация цвета на рис. 3, 4 соответствует убыванию плотности в 4 раза. Белый цвет фона соответствует концентрации НДМГ, которая в 4^7 или в 16 384 раза меньше максимальной концентрации в области, обозначенной черным цветом.

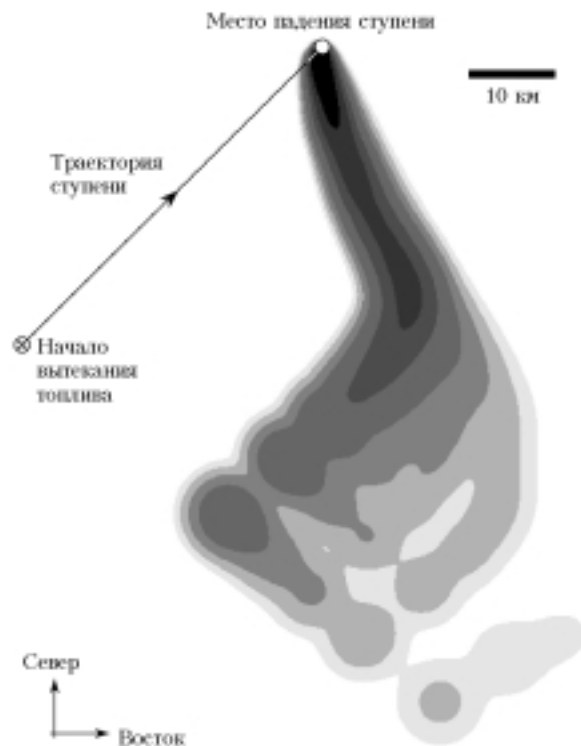


Рис. 4. Распределение плотности достигшего земли НДМГ с учетом влажности. Градации цвета соответствуют изменению плотности в четыре раза. При равномерном вытекании до земли долетает 8,7% топлива

При полной массе выброшенного топлива 300 кг (точнее, массы, оставшейся после начального аэродинамического торможения) максимальная плотность составляет $6,2 \cdot 10^{-6}$ кг/м² (см. рис. 3) и $6,4 \cdot 10^{-6}$ кг/м² (см. рис. 4) в области, окрашенной черным цветом.

Описанная выше модель будет использована для оценок зон загрязнения остатками ракетного топлива в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей, запускаемых с космодрома Байконур.

1. Федосьев В.И. Основы техники ракетного полета. М: Наука, 1979. 496 с.
2. Рапута В.Ф., Садовский А.П., Олькин С.Е., Зыков С.В., Резникова И.К., Смирнова А.И. Оценка характеристик выпадения ракетного топлива по его содержанию в озерной воде // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 14. № 1. С. 80–83.
3. Александров Э.Л. О поведении капель ракетного топлива в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 4. С. 36–45.
4. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду / Под ред. В.В. Адушкина и др. М.: Анкил, 2002. 640 с.
5. Васильев И.Н. Выпадение ракетного топлива при сбросе 2 ступеней ракет // Наука и образование. 1999. № 1. С. 39–41.
6. Александров Э.Л. О скорости падения капель осадков // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1990. Т. 26. № 8. С. 878–880.
7. Зрелов В.Н., Серегин Е.П. Жидкие ракетные топлива. М.: Химия, 1975. 320 с.
8. Сарнер С. Химия ракетных топлив. М.: Мир, 1969. 488 с.
9. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 752 с.
10. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1965. 876 с.
11. Седунов Ю.С. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 208 с.
12. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401-81. М.: Изд-во стандартов, 1988. 178 с.

Yu.N. Morokov, E.G. Klimova, G.S. Rivin, A.I. Borodulin, B.M. Desyatkov, S.R. Sarmanaev, S.V. Zykov. Modeling of ground surface pollution by the rocket fuel.

The falling of UDMH (unsymmetrical Dimethylhydrazine) drops that are formed after flowing-out of residual fuel from the rocket stage is considered. It is supposed that the fuel can flow out either discretely (at single point) or continuously along the falling stage trajectory. The initial process of the drop formation and interactions among the falling UDMH drops are not considered. The falling drop trajectories and the final distribution of UDMH mass precipitated on the earth's surface are calculated using the real meteorological data.