

01;03  
©1993

## ВЛИЯНИЕ РЕАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ РАКЕТ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ ОЗОНОСФЕРЫ

*Р.Ф.Давлетшин, Г.М.Лохов, О.В.Яценко*

Основная масса промышленных выбросов не достигает стратосферных высот благодаря процессам оседания и вымывания осадками. С другой стороны, в область озонового слоя пространственно-селективно впрыскиваются продукты сгорания жидких топлив современных ракет-носителей, влиянием которых на физико-химические процессы в стратосфере нельзя пренебрегать априори.

В данной работе исследовано воздействие ракетных выбросов на кинетику стратосферных фото- и химических превращений, влекущее за собой изменение содержания озона в этой области атмосферы. Загрязнителями считались продукты сгорания стандартных жидких топлив, используемых большинством отечественных ракет-носителей. Для количественного описания фотохимических превращений использовалась разработанная авторами фотохимическая модель загрязненной ракетными выбросами стратосферы [1], включающая 611 химических реакций (в том числе 33 с участием световых квантов в спектральном диапазоне 180–700 нм) между 74 компонентами, и справедливая в диапазоне высот 15–50 км.

Рассматривалась цилиндрически-симметричная задача о диффузии ракетного следа в окружающий газ при одновременном протекании всей совокупности фото- и химических процессов как вне, так и внутри “возмущенной” области. Выброшенное ракетой вещество считалось примесью, процесс диффузии которой описывается соотношением:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = k\Delta n, \quad (1)$$

где  $n$ ,  $t$  и  $k$  — соответственно концентрация примеси, время и коэффициент диффузии. В качестве последнего использовался коэффициент турбулентной диффузии, соответствующий режиму развитой турбулентности. Действительно, из-за низкой плотности и малости турбулентного трения, максимальные масштабы возмущений в атмосфере крайне велики (сотни километров), минимальные соответствуют

длине свободного пробега молекул, а их отношение достигает величины  $10^9$ . В этом случае турбулентная диффузия доминирует над молекулярной и для  $k$  справедлива формула Ричардсона-Обухова [2]:

$$k = cR^{4/3}, \quad (2)$$

где  $c$  — постоянная, характеризующая энергетику источника возмущений и диссипативные свойства газовой среды;  $R$  — средний размер облака примеси. Используя определение  $k = \frac{d}{dt}R^2(t)$ , соотношение (2) можно записать в следующем виде:

$$k = \frac{c^3}{g} t^2. \quad (3)$$

Другими словами, средний размер облака равен:

$$R = \left(\frac{c}{3}\right)^{3/2} t^{3/2}. \quad (4)$$

В этом нетрудно убедиться, подставив (3) в (1) и выписав соответствующее решение для цилиндрически-симметричного случая с дельта-функцией в качестве начального условия.

Важным приближением, позволившим осуществить численную реализацию модели с использованием простых и хорошо зарекомендовавших себя методов, явилась замена реального концентрационного профиля примеси прямоугольным. Физически оно соответствует предположению о мгновенном перемешивании примеси с фоновым газом внутри облака. В этом случае для радиуса концентрационно-однородного облака, имевшего начальный размер  $R_0$ , справедливо соотношение

$$R(t) = \left(R_0^{2/3} + \frac{c}{3}t\right)^{3/2}. \quad (5)$$

Величина  $c$  вычислялась в предположении поглощения в стратосфере всей солнечной радиации в диапазоне длин волн, соответствующем полосам Шапюи — озона и Герцберга — кислорода. В предложенном приближении вся совокупность сложных диффузионных и фотохимических процессов в стратосфере, возмущенной реактивным выбросом ракеты, описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d}{dt}n_i^{(e)} = f_i\left(n_k^{(e)}, T^{(e)}\right), \quad (6)$$

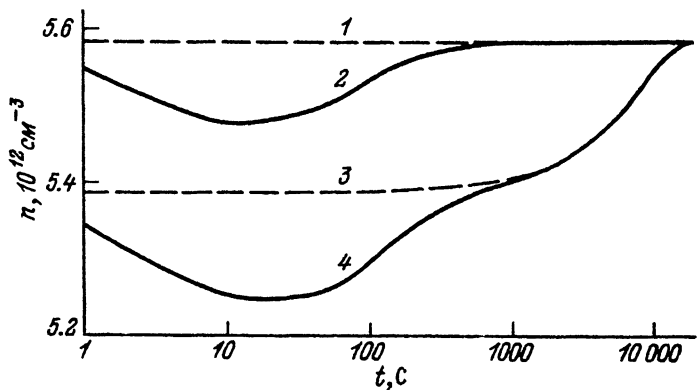


Рис. 1. Динамика изменения содержания озона в стратосфере на высоте 30 км при единичном пуске ракеты-носителя "Протон" (начальный радиус возмущенной области  $R_0$  равен 65 м).

Кривые 1 и 3 определяют поведение  $O_3$  в невозмущенной области стратосферы ночью и днем соответственно [1], кривые 2 и 4 — то же для возмущенной выбросами области.

$$\frac{d}{dt}n_i^{(i)} = f_i(n_k^{(i)}, T^{(i)}) + \frac{c(n_i^{(e)} - n_i^{(i)})}{R_0^{2/3} + \frac{c}{3}t}, \quad \frac{d}{dt}T^{(i)} = \frac{c(T^{(e)} - T^{(i)})}{R_0^{2/3} + \frac{c}{3}t}, \quad (7)$$

где  $T$ ,  $n_i$ ,  $f_i(n_k, T)$  — соответственно температура газа, концентрация частиц сорта  $i$  и скорость наработки частиц этого сорта в химических реакциях; индекс  $(i)$  соответствует области пространства внутри,  $(e)$  — вне облака. В качестве начальных данных использовались характеристики (химические и термодинамические) реактивных выбросов наиболее распространенных тяжелых отечественных ракет-носителей типа "Протон" [3]. Интегрирование системы (6)–(7) осуществлялось при помощи программы [4], реализующей неявный абсолютно устойчивый метод Гира.

Следует отметить, что предложенная модель справедлива в интервале времен  $\sim 1-20\ 000$  с. При меньших временах заметное влияние на эволюцию следа оказывает его динамика, а при больших утрачивает справедливость использованная здесь теория турбулентной диффузии.

Рассчитанное в данной работе изменение концентрации озона в стратосфере в результате возмущения последней реактивным выбросом ракеты приведено на рис. 1 и 2. На выбранной здесь высоте, с одной стороны, концентрация атмосферного озона достигает абсолютного максимума, а с другой, в эту область выбрасывается значительная часть

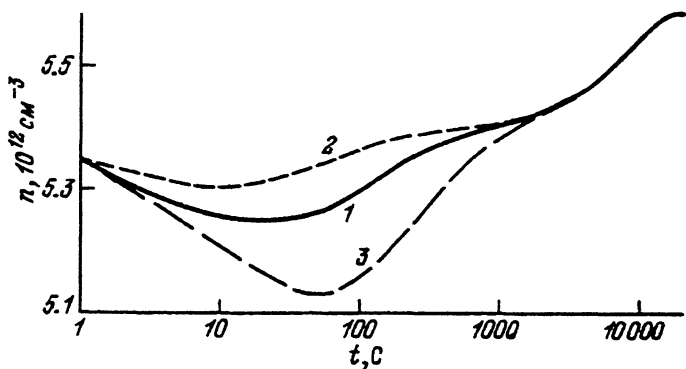


Рис. 2. Влияние коэффициента турбулентной диффузии на результаты расчетов.

Кривая 1 соответствует значению  $c = 4.5 \text{ см}^{2/3}/\text{с}$  (она же кривая 4 на рис. 1); 2 —  $c = 9 \text{ см}^{2/3}/\text{с}$ ; 3 —  $2.25 \text{ см}^{2/3}/\text{с}$ .

продуктов сгорания. Поэтому возможная химическая гибель озона на этих высотах является как наиболее опасной для земной биосферы, так и относительно легко достижимой (вследствие специфики баллистических характеристик современной ракетной техники). Тем не менее, согласно полученным нами результатам, относительное уменьшение концентрации  $\text{O}_3$  в результате гибели на продуктах сгорания ракетных топлив не превышает 2.5% и соответствует суточно-периодическим изменениям этого компонента. При этом время полной регенерации озонового слоя составляет лишь сотни секунд и практически не зависит от величины коэффициента турбулентной диффузии, которая может изменяться в несколько раз при изменении высоты, времени суток и географического положения.

Таким образом, нет никаких оснований ожидать “долговременных” последствий от подобного рода возмущений. Важно подчеркнуть, что подавляющая часть космических объектов выводится на орбиту при помощи ракет-носителей, обладающих значительно меньшей массой, чем рассмотренные в данной работе. Учитывая сходность используемых в космонавтике топлив, нетрудно заключить, что в этих случаях пагубность воздействия космических средств на стратосферный озон значительно ниже, а полученная выше ее (пагубности) оценка является оценкой сверху.

## Список литературы

- [1] *Губанов Е.В., Давлетшин Р.Ф., Яценко О.В.* Препринт МФТИ № 1. М., 1993. 44 с.
- [2] *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 412 с.
- [3] *Власов М.Н.* и др. Отчет по Проекту 4.6.7 ГНТП "Экология России". М., 1992.
- [4] *Затаров А.Ю., Турчанинов В.И.* Препринт ИПМат. М., 1977. 46 с.

Московский физико-технический  
институт

Поступило в Редакцию  
19 июля 1993 г.

---