

## ДИНАМИКА АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.А. Архипов, А.С. Ткаченко, А.С. Усанина

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»  
634050, Томск, Россия*

При эксплуатации летательных аппаратов специальному контролю подлежат районы падения токсичных жидко-капельных аэрозольных образований. В частности, экологическую угрозу для районов падения и прилегающих к ним территорий представляет «гарантийный запас» компонентов жидкого ракетного топлива – гептил, поступающих в окружающую среду при падении отделенной ступени ракеты-носителя, и керосин при аварийном сбросе авиационного топлива. Гептил (несимметричный диметилгидразин) является высокотоксичным химическим веществом. Контролю загрязнения районов падения подвергаются почва, поверхностные водоемы и растительность. Керосин с технической точки зрения считается малотоксичным, однако для жизнедеятельности достаточно вреден.

В настоящей работе представлена физико-математическая модель и результаты численного исследования эволюции токсичного жидко-капельного облака в атмосфере. В разработанной модели учитывались реальные метеорологические условия – сила и направление ветра: предполагалось, что на каждую каплю в аэрозольном облаке, выброшенную в атмосферу с заданной начальной скоростью и начальной температурой, действует сила тяжести, ветровая нагрузка и сила аэродинамического сопротивления, направленная навстречу суммарному вектору скорости капли. Также при моделировании учитывалось изменение во времени температуры капли вследствие конвективно-кондуктивного теплообмена с окружающим воздухом и вклад в теплообмен теплоты фазового перехода при испарении капли, при этом учитывалось изменение размера капли вследствие испарения. Полная система уравнений включает уравнения движения капли, уравнение теплового баланса и уравнение изменения размера капли за счет ее испарения:

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

где  $u_s, v_s, w_s$  – компоненты вектора скорости капли  $\vec{U}_s$ ;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости ветра  $\vec{U}$ ;  $\phi = \frac{3\rho}{8\rho_s r_s} C_D |\vec{U} - \vec{U}_s|$  – комплекс;  $\rho$  – 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;  $Nu=2+0.6Re^{1/2} Pr^{1/3}$  – число Нуссельта;  $Re=2\rho|\vec{U}-\vec{U}_s|r_s/\mu$  – число Рейнольдса относительного движения капли;  $Pr$  – 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.

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 [1]:

- а) внутреннее взаимодействие – массовые инерционные силы преобладают 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 и имеющих одинаковые скорости, равные скорости первичной капли. Процесс дробления капли не является мгновенным и осуществляется в соответствии с закономерностями, выявленными на основании специальных экспериментов. Математическая модель базируется на классических представлениях о механизмах потери устойчивости жидких капель и структуре следа.

Расчет движения, теплообмена и испарения капли завершается при полном ее испарении в атмосфере или при ее осаждении на поверхность земли. При заданных расходных параметрах исходного жидкого компонента в атмосфере возможен расчет массовой концентрации аэрозоля в координатах окончания движения капли (пространственных или поверхностных). Величины всех сил и их соотношений определяются в процессе расчета движения капли в атмосфере.

Проведены параметрические расчеты динамики осаждения жидко-капельного облака при отделении ступеней ракет-носителей и при сбросе авиационного топлива. Для численного интегрирования системы уравнений использовалась неявная разностная схема. Результаты расчетов показали, что конечный диаметр капель одинаков и не зависит от их начального полидисперсного распределения. Вследствие этого моделирование проводилось для монодисперсного облака первичных капель с варьируемым начальным диаметром.

Для практического использования в широких масштабах представленной модели в качестве надежного рабочего инструмента в дальнейшем необходима отработка инструмента в условиях многовариантных параметрических расчетов, создание подсистемы базы данных с возможностью постоянного пополнения и уточнения и создание системы обоснованных экспертных оценок

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред, Москва: Наука, 1987.