УДК 629.764:25+577.7

В. В. ГОРБУНЦОВ[1], А. Н. ЗАВОЛОКА[1], А. П. КРЕМЕНА[2], Н. Ф. СВИРИДЕНКО[1]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МЕТАЕМОГО В АТМОСФЕРУ КАПЕЛЬНОГО ОБЛАКА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИМИСЯ КОМПОНЕНТАМИ ТОПЛИВА

[1]*Институт технической механики*
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, Днепр, Украина, 49005, e-mail: office.itm@nas.gov.ua

[2]*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»,*
ул. Криворожская, 3, 49008, Днепр, Украина; e-mail: andr_petr@ukr.net

Мета роботи – розробка методичного підходу до моделювання еволюції краплинної хмари (КХ), що утворюється при вибуху ракети-носія (РН) із самозаймистими компонентами палива на початковій ділянці траєкторії польоту і метається в атмосферу з початковими параметрами руху, що відповідають положенню РН на траєкторії у момент її вибуху. Запропонований підхід, що базується на використанні феноменологічної аналогії з рухом паливного факела, що уприскується до камери згоряння дизеля, враховує процеси дроблення і трасування крапель, вплив їх зіткнень і можливої коалесценції на структуру і параметри КХ компонентів палива, що трансформується у процесі свого руху. Запропоновано модель еволюції КХ, обумовленої взаємодією крапель у хмарі і її структуризацією у процесі руху, відображає найбільш значущі, з погляду екологічних наслідків аварії, процеси у КХ і дозволяє оцінювати її основні кінематичні і геометричні характеристики, необхідні для розв'язання балістичної задачі руху в атмосфері і осадження на земну поверхню окремих завислих крапель КХ, що метається вибухом РН.

Цель работы – разработка методического подхода к моделированию эволюции капельного облака (КО), образующегося при взрыве ракеты-носителя (РН) с самовоспламеняющимися компонентами топлива на начальном участке траектории полета и метаемого в атмосферу с начальными параметрами движения, соответствующими положению РН на траектории в момент её взрыва. Предлагаемый подход, базирующийся на использовании феноменологической аналогии с движением топливного факела, впрыскиваемого в камеру сгорания дизеля, учитывает процессы дробления и трассировки капель, влияние их столкновений и возможной коалесценции на структуру и параметры КО компонентов топлива, трансформирующегося в процессе своего движения. Предложенная модель эволюции КО, обусловленной взаимодействием капель в облаке и его структурированием в процессе движения, отражает наиболее значимые, с точки зрения экологических последствий аварии, процессы в КО и позволяет оценивать его основные кинематические и геометрические характеристики, необходимые для решения баллистической задачи движения в атмосфере и осаждения на земную поверхность отдельных взвешенных капель КО, метаемого взрывом РН.

The aim of this work is to develop a methodological approach to simulating the evolution of a droplet cloud (DC) formed as a result of an explosion of a launch vehicle with self-inflammable propellant components in the initial portion of the flight trajectory and thrown into the atmosphere with initial motion parameters that correspond to the launch vehicle position at the time of the explosion. The proposed approach, which is based on a phenomenological analogy with the motion of a fuel spray injected in the combustion chamber of a diesel, takes into account the fragmentation and tracing of droplets and the effect of their collisions and possible coalescence on the structure and parameters of the propellant component DC, which undergoes a transformation as it moves. The proposed model of the DC evolution, which is due to droplet interaction in the DC and its structuring in the process of motion, reflects the most important, in terms of the environmental consequences of the explosion, processes in the DC and allows one to estimate its basic kinematic and geometric characteristics required for solving the ballistic problem of the motion of the suspended DC droplets in the atmosphere and their precipitation onto the ground surface.

Ключевые слова: *взрыв, капельное облако, капля, компонент топлива, ракета-носитель.*

Увеличение спроса на предоставляемые космической отраслью услуги и производимую продукцию обусловливает быстрый рост количества участников ее деятельности и, как следствие, повышение уровня коммерциализации отрасли в целом.

Эта устойчивая тенденция, расширяя перспективы развития космической отрасли и инициируя возрастание конкуренции, в том числе на рынке пусковых услуг, одновременно сопровождается увеличением экологических нагрузок на атмосферу Земли и подтрассовые участки ее поверхности. Особенно значимы их последствия при авариях, возникающих на начальном участке полета ракет-носителей (РН), когда в их баках находится значительное количество (до 85 – 90 % от первоначально заправленного) высокоэнергетических токсичных компонентов топлива (КТ), и сопровождающихся взрывами.

Необходимо отметить, что, несмотря на высокий достигнутый к настоящему времени уровень совершенства технологий проектирования, производства и эксплуатации РН и изделий ракетно-космической техники в целом, вероятность подобных аварий все еще достаточно высока, причем именно на начальном участке полета РН продолжительностью около 5 % общего времени полета [1].

Существенной компонентой ущерба от подобных аварий являются затраты на компенсацию негативных последствий экологического характера, характеризующиеся особенно высокими, хотя и не обоснованными в достаточной степени, темпами роста. Это в значительной степени обусловлено давлением хорошо организованных и финансируемых экологических движений [2], активно лоббирующих, в том числе, интересы отдельных участников рынка пусковых услуг.

Существующее положение во многом является следствием отсутствия объективных научно обоснованных методик оценки экологических последствий конкретных аварий РН, в том числе сопровождающихся их взрывами на начальном участке полета. Это объясняется неопределенностью условий возникновения аварии (начальных условий), сложностью и многофакторностью инициируемых явлений, в том числе эволюции капельного облака (КО), образующегося при взрыве РН и метаемого в атмосферу, которое и определяет, в основном, масштаб и характер экологических последствий [1]. Используемые в настоящее время для их оценки методические подходы в подавляющем большинстве своем базируются на моделировании последствий аварий, оставаясь в рамках упрощенных представлений, в том числе рассматривая изменяющийся во времени и пространстве объект исследования (КО) в рамках неизменяющихся закономерностей [3].

Очевидно, что основным фактором, определяющим масштаб и характер экологических последствий взрыва РН на начальном участке ее полета, включая количество выходящих в атмосферу опасных веществ, их последующие превращения, районы выпадения и, в конечном итоге, степень экологических угроз, является энергия, выделяющаяся при взрыве ракеты.

Принципиальная особенность взрыва РН в полете состоит в том, что первоначально смешанной в результате нарушения целостности ракеты оказывается только небольшая часть КТ, находящихся на борту в момент взрыва. Происходящий взрыв, разрушая ракету, препятствует последующему контакту не принявших участие во взрыве КТ, что существенно уменьшает вероятность последующих взрывов [4].

Принимая во внимание это обстоятельство, в качестве расчетного сценария целесообразно рассматривать аварию РН на начальном участке полета, сопровождающуюся наиболее тяжелыми экологическими последствиями, что к тому же позволит устранить неопределенность начальных условий аварии.

В этом случае масса КТ, принявших участие во взрыве, определится выражением

$$M_{\text{ВВ}} = (M_0 - \dot{m}_\Sigma \cdot \tau_{\text{В}}) \cdot K_{\text{уч}},$$

где M_0 – начальная масса КТ в полностью заправленной РН; $\dot{m}_\Sigma$ – расход КТ двигательной установки РН в полете; $\tau_{\text{В}}$ – отрезок времени от старта РН до момента взрыва; $K_{\text{уч}}$ – коэффициент участия во взрыве находящихся на борту РН в момент взрыва КТ.

В соответствии с расчетным сценарием аварии, характеризующимся максимальными экологическими последствиями и, соответственно, минимальным количеством КТ, принявших участие во взрыве, для оценки $K_{\text{уч}}$ целесообразно использовать экспериментальные данные о минимальном значении интенсивности импульса энергии ($I_{\text{п}}$, Дж/(кг·с)) в жидком массиве, обеспечивающем его разрушение, которое составляет $I_{\text{п}} = (4 – 4{,}5) \cdot 10^7$ Дж/(кг·с) [5]. В этом случае, как показано в [1], выражение для оценки минимальной массы заряда взрывчатого вещества (ВВ), образованного смешением КТ, взрыв которого обеспечит разрушение жидкого массива КТ, находящихся на борту РН в момент аварии, может быть представлено в виде

$$M_{\text{вв}}^{\text{р}} = 0{,}62 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{I_{\text{п}} (M_0 - \dot{m}_\Sigma \cdot \tau_{\text{в}})^{4/3}}{\rho_{\text{т}}^{1/3} \cdot E_{\text{тнт}} \cdot f_{\text{кт}}},$$

где $\rho_{\text{т}} = \dfrac{\rho_{\text{о}} k_{\text{т}} + \rho_{\text{г}}}{k_{\text{т}} + 1}$ – средняя плотность ракетного топлива; $k_{\text{т}} = \dfrac{\dot{m}_{\text{о}}}{\dot{m}_{\text{г}}}$ – массовое соотношение КТ на борту РН в момент взрыва [6]; $\rho_{\text{о}}$, $\rho_{\text{г}}$ – плотность окислителя и горючего соответственно; $E_{\text{тнт}} = 4{,}2 \cdot 10^6$ Дж/кг – энергия, выделяющаяся при взрыве 1 кг тротила (тринитротолуола – ТНТ); $f_{\text{кт}}$ – теоретический тротиловый эквивалент (ТЭ) 1 кг жидкого топлива, определяемый отношением удельной теплоты сгорания топлива к удельной энергии взрыва ТНТ.

Для наиболее широко используемых в РН топлив теоретические значения ТЭ составляют [6]:

– $f_{\text{кт}} = 2{,}2$ – для топливной пары «кислород – керосин»;

– $f_{\text{кт}} = 1{,}6$ – для топливной пары «азотный троксид – несимметричный диметилгидразин».

Учитывая характер распределения энергии взрыва, происходящего в массиве жидкости, при котором [7, 8]:

– примерно 10 % всей выделяющейся энергии расходуются на разрушение массива КТ и метание его фрагментов;

– 50 % энергии взрыва уносятся ударной волной (УВ);

– оставшиеся 40 % энергии взрыва уносятся продуктами детонации, формирующими «огненный шар» (ОШ),

можно записать, что суммарное значение $K_{\text{уч}}$, определяющее фактический ТЭ взрыва РН, приводящего к разрушению РН и фрагментации массива жидких КТ, не принявших участие во взрыве, составит

$$K_{\text{уч}} = \frac{10 M_{\text{вв}}^{\text{р}}}{(M_0 - \dot{m}_\Sigma \cdot \tau_{\text{в}})} \approx 6{,}2 \cdot 10^{-4} \frac{I_{\text{п}} (M_0 - \dot{m}_\Sigma \cdot \tau_{\text{в}})^{1/3}}{\rho_{\text{т}}^{1/3} \cdot E_{\text{тнт}} \cdot f_{\text{кт}}}.$$

Масса топлива, не принявшего участия в детонационном процессе, составляет

$$M_{ф} = (M_0 - \dot{m}_{\Sigma} \cdot {}^{2}{}_{в})(1 - K_{уч}) .$$

Эта часть топлива будет разрушаться в процессе взрыва на отдельные фрагменты, средний размер которых составит [1]

$$\overline{X} = 0{,}1 \cdot (M_{вв} \cdot f_{кт})^{1/6} \left(\frac{1 - K_{уч}}{K_{уч} \cdot \sim_{т} \cdot f_{кт}} \right)^{3/2} \tag{1}$$

и которые в результате последующего диспергирования распадутся на капли диаметром

$$d_{м_0} = \frac{2\pm}{{}^{\circ}{}_{в} U_0^2} \mathrm{We}_{кр} \approx 0{,}1\overline{X} , \tag{2}$$

где $\mathrm{We}_{кр}$ – критическое значение числа Вебера [9]; ± – коэффициент поверхностного натяжения КТ; ${}^{\circ}{}_{в}$ – плотность воздуха на высоте взрыва; U_0 – начальная скорость движения фрагментов, образующихся в результате взрыва РН [9].

Отметим, что, как показано в [9], последующее диспергирование жидких фрагментов на капли диаметром $d_{М_О}$ происходит на пути их смещения протяженностью $l < 20\overline{X}$.

Для оценки конечного радиуса облака при сферически симметричном разлете капель целесообразно пользоваться соотношением [10]:

$$R_{ко} = 0{,}072 \cdot \sqrt[3]{\frac{(M_0 - \dot{m}_{\Sigma} \cdot {}^{2}{}_{в})(1 - K_{уч})}{{}^{\circ}{}_{в} \cdot T_{в}} \cdot U_0^2} , \tag{3}$$

где $T_{в}$ – температура воздуха на высоте, где произошел взрыв.

При этом промежуток времени, в течение которого происходит формирование КО, составляет по оценкам [1], [4], [9] от 0,01 с до 0,02 с.

Учитывая, что время формирования КО существенно меньше продолжительности его последующего движения по баллистической траектории, далее будем полагать, что процесс формирования облака происходит практически мгновенно в момент взрыва, а его метание в атмосферу происходит с начальными параметрами, соответствующими кинематическим параметрам движения ракеты (скорости и углу тангажа) в точке взрыва. При этом последующая эволюция КО после его метания определяется особенностями движения и взаимодействия капель в самом облаке.

Следует, однако, иметь в виду, что, несмотря на практическую значимость проблемы моделирования эволюции капельного облака (метаемого в атмосферу со значительной начальной скоростью [3]), для оценки экологических последствий аварии РН до сих пор отсутствуют достаточно адекватные постановки и эффективные решения ряда задач, относящихся к описанию процессов, протекающих в движущемся в атмосфере КО.

Известные теоретические построения [11] выполнены на основе упрощенных физических представлений, рассматривавшихся в квазистационарной постановке, как правило, перегруженных большим количеством трудноопределимых параметров и, в отсутствие целостного системного подхода к исследованию эволюции КО, не позволяют учитывать скоростную неравновесность компонент в различных зонах облака и особенности их взаимодействия между собой.

В этом плане более продуктивным представляется подход, использующий результаты исследований феноменологически подобного процесса эволюции головной части факела топливной струи, впрыскиваемой в камеру сгорания дизеля [12]. Экспериментальные наблюдения этого процесса и анализ их данных позволили разработать адекватную модель головной части факела такой струи, включающей фронтальную зону и зону шлейфа.

В процессе перемещения в воздушной среде фронтальная зона интенсивно тормозится под действием аэродинамического сопротивления, а шлейфовая часть факела, двигаясь за фронтальной в спутном потоке и испытывая меньшее сопротивление, догоняет и взаимодействует с ней.

Эта часть процесса представляет собой, по сути, взаимодействие полидисперсной струи с преградой [7], [12], особенность которого заключается в том, что в непосредственное взаимодействие со средой вступает капельный поток, в котором, кроме того, могут происходить процессы вторичного дробления, столкновения капель, их коагуляции и т. п. Указанные процессы протекают одновременно и непрерывно, поэтому полное рассмотрение всей их совокупности, определяющей характер и особенности динамики эволюции капельного облака, метаемого в неподвижную атмосферу, с учетом реального распределения в нем капель, вряд ли возможно. Однако значительный объем содержательных результатов экспериментальных и теоретических исследований влияния определяющих параметров на движение топливного факела в неподвижной среде [12] может быть продуктивно использован при разработке аналитической модели эволюции метаемого в атмосферу капельного облака КТ, образующегося при взрыве РН на начальном участке траектории ее полета.

Как и в случае формообразования головной части топливного факела дизеля, форму фронтальной зоны капельного облака КТ, метаемого в атмосферу со скоростью движения РН в момент взрыва $V_{\text{РН}}$, определяют, главным образом, крупные капли, характеризующиеся максимальной дальнобойностью и концентрирующиеся, поэтому, в передней (фронтальной) части облака. Эти капли, взаимодействуя с невозмущенной окружающей средой, интенсивно тормозятся ею. При этом за ними формируются вихревые «следы» (трассы), в которых сопротивление воздуха движению последующих капель понижено вследствие перехода потенциальной энергии давления в кинетическую энергию вихрей, рассеивающуюся в окружающем пространстве, а скорость движения воздуха в следе меньше, чем скорость набегающего на фронтальную каплю потока [13].

Поэтому капли, находящиеся в тени головной (фронтальной) капли, как и движущиеся на некотором расстоянии от нее с меньшими потерями скорости, чем фронтальная капля, в конечном итоге, будут сталкиваться с ней. Получив дополнительный импульс и, возможно (в случае коагуляции), увеличив свою массу, фронтальная капля скачкообразно увеличит скорость своего движения, после чего снова начнется режим ее торможения до следующего столкновения.

При такой схеме движения, подтверждаемой экспериментальными данными [12], капли во фронтальной зоне КО будут периодически получать дополнительные силовые импульсы и продвигаться вперед, чередуя циклы ускорения и торможения при постепенном общем торможении облака.

Капли, не попавшие первоначально в трассы, быстро теряют скорость, «зависают» и не оказывают определяющего влияния на скорость движения фронта облака; капли же, выстраивающиеся вслед за впереди летящими каплями, будут ускорять фронтальные капли, сталкиваясь с ними, хотя средняя скорость их собственного движения при этом будет постепенно уменьшаться.

Вероятность выстраивания более мелких капель в следах фронтальных капель и последующего их преимущественного движения по таким трассам достаточно высока, т. к. давление воздуха в трассах понижено по сравнению с промежутками между трассами. Поэтому капли, движущиеся за фронтом облака, будут «скатываться» в трассы, в результате чего их движение в КО приобретает строго организованный характер по спонтанно формирующимся в нем трассам.

В головной (фронтальной) части облака характер движения капель определяется, как уже отмечалось, главным образом столкновениями капель, находящихся на трассе, с каплями, двигающимися впереди их по этой же трассе. Эти столкновения, сопровождаясь перераспределением кинетической энергии между взаимодействующими каплями, могут инициировать ряд других процессов в КО, в том числе коагуляцию капель, их вторичное дробление и т. д.

Феноменологическая модель топливного факела дизеля имеет ряд косвенных доказательств, увязанных с расчетными и экспериментальными данными [7], что позволяет сделать вывод о высокой степени адекватности феноменологически аналогичной модели эволюции капельного облака КТ, метаемого в атмосферу с начальной скоростью движения ракеты в момент взрыва. Однако успешное использование указанной модели для решения задачи эволюции КО, движущегося в атмосфере, предполагает необходимость разработки методического подхода к определению:

– характеристик дисперсности капель в облаке и параметров формирующихся в нем капельных трасс;

– кинематических характеристик движения капель в трассах;

– параметров и критериев, характеризующих особенности взаимодействия капель в трассах и их влияние на характер процесса формообразования движущегося КО с учетом специфики решаемой задачи.

Полагая, что распределение капель в сформировавшемся в результате взрыва РН капельном облаке КТ соответствует закону Розина–Раммлера [7, 12], а массовая доля наиболее крупных фронтальных капель составляет $G_{\text{к}}$, запишем выражения, определяющие медианные диаметры двух групп капель – крупных $d_{\text{кк}}$ и мелких $d_{\text{км}}$:

$$d_{\text{кк}} = d_{\text{м}_0}\sqrt{1-\frac{\ln G_{\text{к}}}{0{,}693}}\,, \tag{4}$$

$$d_{\text{км}} = d_{\text{м}_0}\sqrt{1-\frac{\ln(1-G_{\text{к}})}{0{,}693}}\,, \tag{5}$$

где $d_{\text{м}_0}$ – медианный диаметр всей совокупности капель, образующих капельное облако, метаемое со скоростью $V_{\text{РН}}$ в момент взрыва РН.

С учетом (1), (2) выражения (4), (5) могут быть представлены в виде

$$d_{\text{кк}} = 0{,}14 \cdot \overline{X} \sqrt{\ln \frac{2}{G_{\text{к}}}}\ , \tag{6}$$

$$d_{\text{км}} = 0{,}14 \cdot \overline{X} \sqrt{\ln \frac{2}{1 - G_{\text{к}}}}\ . \tag{7}$$

Количество капель каждой группы (крупные, мелкие) в облаке с учетом (6), (7) составит

$$n_{\text{кк}} = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{G_{\text{к}}(M_0 - \dot{m}_{\Sigma}^2 {}_{\text{в}})(1 - K_{\text{уч}})}{d_{\text{м}_0}^3 \cdot \rho_{\text{т}}}\ , \tag{8}$$

$$n_{\text{км}} = n_{\text{кк}} \cdot \frac{1 - G_{\text{к}}}{G_{\text{к}}}. \tag{9}$$

В предположении, что все крупные капли сосредоточены во фронтальной зоне облака и равномерно распределены по его поверхности, определяя количество трасс, формирующихся в нем, можно записать соотношения, определяющие число мелких капель в каждой трассе

$$\frac{n_{\text{км}}}{n_{\text{кк}}} = \frac{1 - G_{\text{к}}}{G_{\text{к}}}\ ,$$

и с учетом (3) получить соотношения для определения среднего начального расстояния между отдельными каплями на трассе

$$\Delta l_{\text{т}} \approx \frac{1{,}6 R_{\text{ко}}}{\sqrt[3]{n_{\text{км}}}} = \frac{0{,}0093}{\sqrt[3]{1 - G_{\text{к}}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{т}} U_0^2}{\rho_{\text{в}} T_{\text{в}}}} \cdot \overline{X}$$

и расстояния между трассами

$$\Delta l_{\text{тт}} \approx \frac{1{,}6 R_{\text{ко}}}{\sqrt{n_{\text{км}}}} = \frac{0{,}0026}{\sqrt{G_{\text{к}}}} \cdot \frac{\rho_{\text{т}}^{1/2}}{\left(\rho_{\text{в}} T_{\text{в}}\right)^{1/3}} \cdot \frac{U_0^{2/3} \cdot \overline{X}^{3/2}}{\left[(M_0 - \dot{m}^2 {}_{\text{в}}) \cdot (1 - K_{\text{уч}})\right]^{1/6}}. \tag{10}$$

Изменение скорости движения отдельных капель в трассах КО, в допущении постоянства плотности воздуха вдоль трассы, пренебрежимо малого влияния силы тяжести и постоянства коэффициента лобового сопротивления C_x [13], описывается соотношением [9]

$$U_{\text{к}} = U_{\text{к}_0} \cdot \exp(-Ax)\ , \tag{11}$$

где $A = \frac{3}{4} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{т}}} \frac{C_x}{d_{\text{к}}}$ – баллистический коэффициент капли; $d_{\text{к}}$ – диаметр капли.

Необходимо иметь в виду, что допущение о постоянстве C_x приемлемо лишь для приближенных оценок. В общем случае необходимо учитывать зависимость C_x от скорости $U_{\text{к}}$ (или от числа Маха) [9].

Соотношение (11) позволяет оценивать (при соответствующих подстановках начальных условий $U_{\text{к}}(0) = U_{\text{к}_0}$) скорость движения головной (фронтальной) и следующих за ней в трассе капель.

Для определения закона движения капель, следующих за головной каплей, необходимо знать скорость движения воздуха в трассе за ней, т. е. в ее вихревом следе.

В этом плане целесообразно использовать методику решения задачи о дальнем осесимметричном следе за каплей, обтекаемой потоком, основанную на теории пути смешения Прандтля [14] и позволяющую получить зависимость полуширины осесимметричного следа за каплей от расстояния x в виде

$$¢ = kx^{1/3},$$

где

$$k = \frac{3}{2}\left(\frac{{}^{2} \cdot C_x \cdot d_{\text{к}}^2}{2A}\right)^{1/3}.$$

Для осесимметричного следа A ù 0,129, а $\approx 0{,}2$, поэтому после соответствующих постановок и преобразований можно получить, что полуширина следа за каплей определится выражением

$$¢ = 0{,}81 \cdot \sqrt[3]{C_x \cdot d_{\text{к}}^2 \cdot x}\,. \tag{12}$$

Минимальная скорость воздуха в следе за головной каплей определяется выражением

$$U_{1\text{м}} = \frac{n \cdot V_{\text{РН}}}{x},$$

где $n = \frac{1}{36}\sqrt[3]{\frac{2C_x d_{\text{к}}^2}{A}}$, или, после подстановки значений A и ,

$$U_{1\text{м}} = 0{,}746\frac{\sqrt[3]{C_x d_{\text{к}}^2}}{x}V_{\text{РН}}.$$

В рассматриваемом режиме обтекания капли, в качестве области, в которой сказывается влияние капли на общий поток воздуха, будем рассматривать цилиндрическую зону, диаметр которой равен, с одной стороны, удвоенной ширине осесимметричного следа за каплей, а с другой – расстоянию между отдельными трассами:

$$2¢ = \Delta l_{\text{тт}}. \tag{13}$$

Принимая во внимание, что характерная длина следа за каплей ($l_{\text{сл}}$) составляет не более $8\,d_{\text{к}}$ [13], [14], из (13) после подстановок (10), (12) можно получить соотношение для оценки $G_{\text{к}}$:

$$G_{\text{к}} \cdot \ln\frac{2}{G_{\text{к}}} = 1{,}24 \cdot 10^{-4}\frac{{}_{\text{т}}U_0^{4/3}\overline{X}}{\sqrt[3]{({}^{\circ}{}_{\text{в}}T_{\text{в}}C_x)^2(M_0 - \dot{m}_{\Sigma}{}^{2}{}_{\text{в}}) \cdot (1 - K_{\text{уч}})}},$$

при котором все капли в КО движутся по трассам, формирующимся в процессе его структурирования при метании.

Скорость движения воздуха в следе за головной каплей, с учетом (11), составляет

$$U_{\text{сл}} = U_{\text{к}} - U_{1\text{м}} = V_{\text{РН}}\left[\exp\left(-A\cdot 3{,}2R_{\text{ко}}\right) - \frac{0{,}746}{\bar{l}_{\text{сл}}}\cdot\left(\frac{C_x}{d_{\text{кк}}}\right)^{1/3}\right], \qquad (14)$$

где $U_{\text{к}} = V_{\text{РН}}\cdot\exp\left(-A\cdot 3{,}2R_{\text{ко}}\right)$; $\bar{l}_{\text{сл}} = \dfrac{l_{\text{сл}}}{d_{\text{кк}}}$ – относительная длина следа за каплей.

Как следует из (11) и (14), скорость движения капель во фронте облака и на трассах (в следах) может существенно различаться. Скорость движения фронтальных капель постепенно уменьшается, так что движущиеся следом капли, испытывая меньшее сопротивление воздуха, будут догонять их и, сталкиваясь, вступать с ними во взаимодействие. В результате скорость крупных (фронтальных) капель будет возрастать, а скорость мелких более медленно уменьшаться, быстро приближаясь к скорости их равномерного движения [5]. При этом, ввиду более интенсивного торможения фронтальных капель окружающей средой, по истечении некоторого времени все мелкие капли сконцентрируются во фронтальной зоне движущегося в атмосфере капельного облака.

Столкновения капель могут сопровождаться не только изменением скоростных режимов их движения, обусловленных упругим или неупругим взаимодействием, но и коагуляцией, приводящей к увеличению массы головной капли.

В первом случае, как показано в [15], взаимодействие сталкивающихся капель диаметром меньше $5\cdot 10^{-3}$ м является неупругим с коэффициентом восстановления *K*, изменяющимся в диапазоне значений от 0,75 до 0,80.

Возможность коагуляции сталкивающихся капель определяется соотношением между кинетической энергией ударяющей (мелкой) капли и поверхностной энергией ударяемой капли, характеризующей «прочность» ее поверхности, которая противодействует прониканию кумулятивной струи, формирующейся при любой геометрии столкновения, сквозь поверхность крупной капли [16].

Соответствующее условие возникновения коагуляции при столкновении капель может быть представлено в виде

$$d_{\text{км}}\left(U_{\text{км}} - U_{\text{кк}}\right)^2 \geq 12\frac{\pm}{\circ_{\text{т}}}\left(\frac{d_{\text{кк}}}{d_{\text{км}}}\right)^2 . \qquad (15)$$

Каждый акт коагуляции будет увеличивать массу головной (фронтальной) капли и, следовательно, ее инерционность, тем самым замедляя эффект последующего уменьшения ее скорости. При этом капли из следов будут постоянно догонять головные (фронтальные) капли и сливаться с ними, в результате чего по истечении некоторого времени все капли сконцентрируются в зоне, непосредственно прилегающей к фронту КО, так что дальнейшее его развитие и движение будет определяться, главным образом, движением его фронтальной зоны.

Изложенный выше механизм эволюции КО, метаемого в окружающую среду со скоростью, равной скорости движения РН в точке взрыва, справедлив и при коагуляции соударяющихся капель, происходящей при выполнении условия, определяемого соотношением (15). В обоих случаях (отсутствия или наличия коагуляции) протяженность и последующее движение КО определяется протяженностью и скоростью движения его фронтальной зоны. В первом случае протяженность этой зоны будет примерно равна сумме диаметров капель, находящихся в трассе; во втором случае необходимо принимать во внимание изменение размера фронтальной капли и возможность ее вторичного дробления в потоке воздуха.

Таким образом, приведенные методические материалы и соотношения позволяют рассчитывать геометрические и кинематические параметры КО, образовавшегося при взрыве РН и метаемого в атмосферу, с учетом его эволюции, обусловленной взаимодействием капель в облаке и его структурированием в процессе движения, являющиеся исходными данными при решении баллистической задачи движения облака.

В заключение остановимся на особенностях эволюции КО самовоспламеняющихся КТ.

Самовоспламеняемость – весьма значимое достоинство ракетного топлива, значительно упрощающее запуск двигателя РН, осуществление многоразовости его включения, что особенно существенно для двигательных установок космических ступеней и т. п. Указанные обстоятельства и определили широкое использование самовоспламеняющихся топлив в ракетной технике (РН «Циклон», РН «Протон», РН «Рокот» и т. д.).

Подавляющее большинство современных самовоспламеняющихся топлив – это топлива на основе азотнокислотных или азотнооксидных окислителей, в которых горючими являются гидразин и его производные или горючие на основе аминов [6]. У таких топлив период задержки воспламенения составляет от 0,003 с до 0,12 с и быстро возрастает с понижением температуры. Поэтому при достаточно низких температурах (меньше 243°K) и давлениях самовоспламеняющееся топливо может стать несамовоспламеняющимся.

Развитие процесса жидкофазного взаимодействия компонентов самовоспламеняющегося топлива можно представить следующей схемой. При соприкосновении капель компонентов или при погружении капли одного компонента в каплю другого, в области контакта сред образуется смесь, в которой начинаются жидкофазные окислительно-восстановительные экзотермические реакции [6], которые являются своеобразным источником тепла для воспламенения топлива; они обеспечивают испарение компонентов, нагрев смеси паров с одновременным образованием промежуточных активных центров реакций и дальнейшее спонтанное развитие процесса взаимодействия в газовой фазе вплоть до их воспламенения.

При образовании в смеси КТ очага возгорания объемом более 5 % от суммарного ее объема происходит переход к стационарному режиму горения [6].

Чем химически активнее компоненты, выше тепловой эффект реакции, крупнее капли, больше начальная температура КТ, тем интенсивнее развивается процесс возникшего горения.

По достижении температуры фазового превращения часть смеси газифицируется, покидая зону жидкофазных реакций, и процесс продолжается уже в газовой фазе.

Для обеспечения самовоспламенения достаточен подогрев газовой фазы за счет жидкофазных реакций до температуры (45 – 500)°K.

При анализе влияния самовоспламеняемости на эволюцию капельного облака будем полагать, что соотношение масс капель окислителя и горючего как во фронтальной зоне облака, так и на трассах в его шлейфовой зоне соответствует действительному массовому соотношению КТ на борту РН в момент взрыва.

С учетом указанного обстоятельства и принимая во внимание, что по расчетным оценкам суммарная масса мелких капель на трассе значительно (более чем в 10 – 20 раз) превосходит массу головной (фронтальной) капли трассы, пренебрегая последней (без внесения существенных погрешностей), из (7) – (9) можно получить выражения для определения общей массы окислителя и горючего на трассе

$$M_{о_\Sigma}^{тр} = 0{,}042 \cdot \frac{k_т}{k_т + 1} \cdot \frac{1 - G_к}{G_к} \cdot \overline{X}^3 \left(\ln \frac{2}{G_к} \right)^{3/2} \cdot \bar{\sigma}_т\,;$$

$$M_{г_\Sigma}^{тр} = 0{,}042 \cdot \frac{1}{k_т + 1} \cdot \frac{1 - G_к}{G_к} \cdot \overline{X}^3 \left(\ln \frac{2}{G_к} \right)^{3/2} \cdot \bar{\sigma}_т\,.$$

Масса КТ, которая после коагуляции капель примет участие в стехиометрической жидкофазной реакции самовоспламенения и сгорит, составит

$$M_{сг} = M_{о_\Sigma}^{тр} + \frac{M_{о_\Sigma}^{тр}}{k_{т_0}},$$

где $k_{т_0}$ – стехиометрическое соотношение используемых на РН компонентов топлива [17].

В результате горения выделится количество тепла

$$Q_{сг} = M_{сг} \cdot H_{сг}\,,$$

где $H_{сг}$ – теплотворная способность топлива при стехиометрическом сгорании, кДж/кг [6].

Это тепло обеспечит частичное испарение непрореагировавших капель горючего в трассе

$$M_{г_{исп}} = \frac{M_{сг} \cdot H_{сг}}{r_г}\,,$$

где $r_г$ – удельная теплота испарения горючего, кДж/кг, в результате чего масса головной капли трассы определится соотношением

$$M_{гк} = 0{,}042 \cdot \frac{k_{т_0} - k_т}{k_{т_0}(k_т + 1)} \cdot \frac{1 - G_к}{G_к} \cdot \overline{X}^3 \left(\ln \frac{2}{G_к} \right)^{3/2} - \frac{Q_{сг}}{r_г}\,,$$

а диаметр этой капли

$$d_{гк} = \left(\frac{6}{®} \cdot \frac{M_{гк}}{°_г} \right)^{1/3}.$$

Суммарная площадь миделева сечения фронтальных капель облака составит, с учетом (8),

$$S_\Sigma = n_{кк} \cdot \frac{® d_{гк}^2}{4}\,.$$

Таким образом, в результате возникновения и развития в КО стехиометрических жидкостных реакций, обусловленных столкновениями и коагуляцией капель самовоспламеняющихся КТ, будет происходить изменение химического состава КО, сопровождающееся практически полным выгоранием окислителя и значительной части горючего. Остаток горючего в облаке составит

$$M_{\text{г}}^{\text{ост.}} = (M_0 - \dot{m}_{\Sigma}{}^{2}{}_{\text{В}}) \cdot \frac{k_{\text{Т}_0} - k_{\text{Т}}}{(k_{\text{Т}} + 1) \cdot k_{\text{Т}_0}},$$

что позволяет объективно оценить экологическую опасность при взрыве РН на самовоспламеняющихся КТ.

1. *Пилипенко О. В., Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф.* Определение характеристик капельного облака компонентов топлива, формирующегося при взрыве ракеты-носителя в полете. Техническая механика. 2017. № 1. С. 3–14.
2. *Демирчан К. С., Кондратьев К. Е., Данилевич Я. Б., Демирчан К. К.* Сценарии опасных изменений климата по МГЭИК основаны на реалистичных предпосылках. Изв. РАН. Энергетика. 2003. № 4. С. 89–121.
3. *Архипов В. А., Жарова И. К., Козлов Е. И., Ткаченко А. С.* Прикладные аспекты экологии при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники. Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 8. С. 636–641.
4. *Суржиков С. Т.* Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий: Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: в 3-х т. Т.1: под ред. С. В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. С. 157–172.
5. *Стебновский С. В., Черютаев Н. Н.* Влияние динамики нагружения жидкого облака на механизм его разрушения. ПМТФ. 1987. № 5. С. 134–139.
6. *Пономаренко В. К.* Ракетные топлива. СПб.: Изд-во ВИККА, 1995. 619 с.
7. *Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.
8. Физика взрыва: под ред. Л. П. Орленко: в 2-х т. Т. 2. М.: Наука, 2004. 656 с.
9. *Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М.* Разновидность дробления капель в ударных волнах и их характеристики. ИФЖ. 1974. Т. 27, № 1. С. 119–126.
10. *Коваленко О. В.* Динамическое разрушение и диспергирование конденсированных сред. Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. 05.03.16. М.: МИФИ, 1991. 20 с.
11. *Архипов В. А., Березинов А. П., Ткаченко А. С., Усанина А. С.* Обобщенная модель распространения жидкокапельного облака при аварийном сбросе авиационного топлива. Изв. ВУЗов. Физика. 2010. № 12 (2). С. 10–13.
12. *Свиридов Ю. Б., Малявинский Л. В., Вихерт М. М.* Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.
13. *Мельников А. П.* Краткий курс аэродинамики. Л.: Изд-во ЛКВВИФ, 1949. 261 с.
14. *Абрамович Г. Н.* Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 400 с.
15. *Бабуха Г. Л., Шрайбер А. А.* Влияние соударений частиц полидисперсного материала на движение и межфазовый теплообмен в вертикальном двухфазном потоке. ПМТФ. 1966. № 4. С. 23–29.
16. *Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.* Физические аспекты кумуляции. ФГВ. 1980. № 5. С. 26–40.
17. *Кузнецов А. А.* Оптимизация параметров баллистических ракет по эффективности. М.: Машиностроение, 1986. 160 с.

Получено 09.01.2018,
в окончательном варианте 21.02.2018