

УДК 629.764+581.567

Э. Г. Гладкий

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», Днепропетровск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ОПАСНОСТИ В РАЙОНАХ ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЫСОТЫ ИХ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

При штатном полете ракеты-носителя (РН) основная опасность для наземных объектов создается в районах падения отделяющихся частей (ОЧ). Построена модель оценки риска для объектов в зоне падения ОЧ с учетом неопределенности высоты ее первоначального разрушения. Показано практическое использование разработанной модели для построения опасной зоны, в пределах которой риски для людей превышают допустимый уровень. Полученная опасная зона позволяет сделать более корректным назначение размера выделенного района для падения ОЧ.

Ключевые слова: ракета-носитель, отделяющаяся часть, высота первоначального разрушения, фрагментация, район падения, риск поражения объекта, опасная зона.

При проектировании и эксплуатации современных ракет-носителей (РН) вопросы обеспечения и оценки безопасности занимают одно из центральных мест. Традиционно принято считать, что уровень опасности от технической системы, которая функционирует в штатном режиме, предусмотренном проектной и эксплуатационной документацией, значительно ниже уровня опасности в случае ее аварии. Специфика современных РН состоит в том, что даже в процессе штатного выведения КА по трассе полета есть участки с высоким локальным уровнем риска. Он обусловлен падением отделяющихся частей (ОЧ) ракет-носителей: отработавших ступеней, створок головного аэродинамического обтекателя и т. д.

С целью обеспечения безопасности при штатной эксплуатации КРК для выбранных трасс полета РН специально предусматриваются зоны для падения ОЧ, так называемые выделенные

районы для падения ОЧ. Традиционно такие районы представляются в виде эллипсов, куда с заданной вероятностью (например 0.997) будут попадать неразрушенные ОЧ или фрагменты ОЧ после их разрушения на участке пассивного падения. На суше выделенные для падения ОЧ районы представляют территории, в пределах которых нет населенных пунктов, объектов народного хозяйства и не ведется какая-либо хозяйственная деятельность. Кроме того, в таких районах осуществляется экологический мониторинг и проводится комплекс мероприятий по обнаружению упавших ОЧ или их фрагментов с целью дальнейшей утилизации, а при необходимости — дезактивации местности.

Особенностью процесса движения ОЧ на участке пассивного падения является возможность ее разрушения. Конструкция ступени РН проектируется таким образом, чтобы она не разрушалась при внешних и внутренних воздействиях на всех этапах штатной эксплуатации (при транспортировке, в процессе подготовки РН к



Рис. 1. Зоны падения фрагментов отделяющихся частей в зависимости от высоты первоначального разрушения

пуску, на активном участке траектории полета). Участок пассивного падения ОЧ после ее отделения, хотя и может рассматриваться как часть штатного этапа эксплуатации РН, однако разработчиками не ставится задача обеспечения прочности конструкции ОЧ на этом участке полета. Таким образом, на участке пассивного падения возможно разрушение конструкции ОЧ вследствие аэродинамического и теплового воздействия. Если для ОЧ первой ступени разрушение является случайным событием, то для ОЧ верхних ступеней (второй и последующих) это событие становится достоверным.

Возможность разрушения ОЧ первых ступеней жидкостных РН на траектории пассивного падения с одной стороны определяется характером траектории, высотой и параметрами движения на момент разделения, а с другой — процессами, протекающими в баках, и прочностными возможностями ступени. Статистические данные по пускам РН разработки ГП «КБ «Южное» показывают, что отсутствие разрушения ОЧ первой ступени в основном характерно для РН,

которые были созданы на базе боевых баллистических ракет. Для них существенная прочность конструкции приводит к тому, что ОЧ первой ступени на участке пассивного падения чаще всего не разрушаются.

Определяющей с точки зрения размеров выделенного района падения ОЧ и его расположения является высота первоначального разрушения ОЧ, которая носит случайный характер. В случае разрушения ОЧ ступени на больших высотах зона рассеивания фрагментов увеличивается, а ее центр смещается в сторону точки старта (в недолет), и, наоборот, при снижении высоты первоначального разрушения центр области рассеивания фрагментов ОЧ смещается в противоположную сторону, а ее размер уменьшается. Из-за неопределенности процесса разрушения ОЧ на участке пассивного падения район для ее падения выбирается таким образом, чтобы независимо от реализовавшейся высоты первоначального разрушения ОЧ, область рассеивания фрагментов целиком находилась в пределах выделенного района (рис. 1). Фрагментация корпуса ОЧ на

участке пассивного падения определяет характер поражающих факторов. При падении неразрушенной ОЧ первой ступени возможен ее взрыв и заражение местности токсичными компонентами ракетного топлива для пары АТ+НДМГ. В случае разрушения ОЧ на участке пассивного падения основным поражающим фактором для наземных объектов является динамическое воздействие образовавшихся фрагментов. При этом в зависимости от реализовавшейся высоты первоначального разрушения ОЧ будет различаться и количество образующихся фрагментов, достигающих поверхности Земли: чем выше произошло разрушение ОЧ, тем большего количества фрагментов следует ожидать.

В последнее время при обеспечении безопасности технических систем за основу принимается концепция приемлемого риска [2]. Ее суть состоит в том, что разработчикам необходимо стремиться к достижению такого уровня риска от опасных факторов, порождаемых технической системой и процессом ее эксплуатации, который можно рассматривать как приемлемый. Уровень приемлемого риска для процесса эксплуатации КРК определяется национальными либо международными нормами и обычно находится в пределах 10^{-5} — 10^{-6} на один пуск РН.

Концепция приемлемого риска может быть использована для более корректного обоснования размеров выделенных для падения ОЧ районов, а также оценки общего фона опасности. С этой целью, прежде всего, необходимо определить опасные зоны, где риски для людей превышают допустимый уровень (в районах падения ОЧ какие-либо хозяйственные объекты отсутствуют). Для построения таких зон необходимо иметь корректные модели оценки безопасности, которые в том числе должны строиться с учетом разрушения ОЧ на участке пассивного падения.

Поскольку наибольший уровень риска при пусках РН характерен для района падения ОЧ первой ступени, построим для него математическую модель оценки риска поражения наземного объекта. В общем случае событие поражения объекта, находящегося в районе падения ОЧ первой ступени, определяется следующим образом:

$$\mathbf{B}_{\text{ОЧ}} = \mathbf{A}_1 \cap [\mathbf{A}'_2 \cup \mathbf{A}''_2], \quad (1)$$

где $\mathbf{B}_{\text{ОЧ}}$ — событие поражения наземного объекта при падении отделяющихся частей I ступени; \mathbf{A}_1 — событие нормального функционирования РН на этапе полета I ступени до момента отделения ОЧ, включая процесс отделения ОЧ; \mathbf{A}'_2 — событие поражения наземного объекта в случае неразрушения ОЧ; \mathbf{A}''_2 — событие поражения наземного объекта фрагментами отделяющихся частей I ступени в случае ее разрушения на участке пассивного падения.

Исходя из выражения (1), формулу для определения вероятности поражения наземного объекта, находящегося в районе падения ОЧ первой ступени, запишем так:

$$R_I = P_I(R_{\text{рз}} + R_{\text{нрз}}), \quad (2)$$

где P_I — вероятность безотказной работы РН на этапе полета I ступени (включая процесс отделения первой ступени), $R_{\text{рз}}$ — вероятность поражения объекта при разрушении отделяющихся частей I ступени, $R_{\text{нрз}}$ — вероятность поражения объекта в случае неразрушения отделяющихся частей I ступени.

Поскольку на участке пассивного падения внешнее воздействие на ОЧ и несущая способность ее конструкции носят случайный характер, при определении $R_{\text{рз}}$ будем использовать вероятностную трактовку высоты первоначального разрушения ОЧ. С этой целью введем функцию вероятности разрушения ОЧ первой ступени на участке пассивного падения в зависимости от высоты полета $P_{\text{рз}}(h)$. С ее помощью вероятность поражения объекта, находящегося в районе падения ОЧ I ступени, при разрушении ОЧ на участке пассивного падения может быть определена следующим образом:

$$R_{\text{рз}} = \frac{1}{h_*} \int_0^{h_*} P_{\text{рз}}(h) \cdot \Delta R_{\text{рз}}(h) dh, \quad (3)$$

где h_* — начальная высота, начиная с которой возможно разрушение отделяющихся частей I ступени, $P_{\text{рз}}(h)$ — вероятность разрушения отделяющихся частей I ступени на высоте h , $\Delta R_{\text{рз}}(h)$ — вероятность попадания хотя бы одного фрагмента ОЧ в зону поражения объекта в случае фрагментации ОЧ на высоте h .

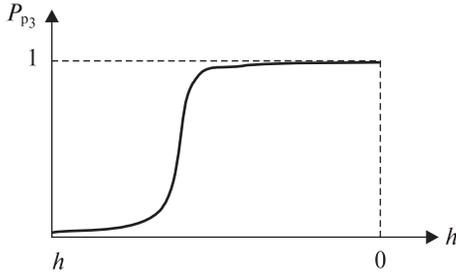


Рис. 2. Вероятность разрушения отделяющихся частей первой ступени

Учитывая увеличивающийся уровень нагрузок на ОЧ при ее падении, вероятность первоначального разрушения ОЧ первой ступени при уменьшении высоты полета носит возрастающий характер, как показано на рис. 2. Для получения функции $P_{p3}(h)$ необходимо для атмосферного участка пассивного падения ОЧ провести оценку вероятности разрушения ступени (оценить прочностную надежность). С этой целью могут быть использованы параметрические вероятностные модели. Указанная задача фактически обратна задаче оценки прочностной надежности конструкции ОЧ ступени, таким образом, что

$$P_{p3}(h) = 1 - \text{Вер} \{R(l, h) - S(l, h) > 0\}, \quad (4)$$

где $R(l, h)$, $S(l, h)$ — несущая способность конструкции отделяющихся частей I ступени и действующая на нее нагрузка в сечении l для высоты полета h .

Для построения функции $P_{p3}(h)$ необходимо определить значения вероятности разрушения ОЧ первой ступени для различных высот на участке пассивного падения ОЧ согласно (4). Далее с использованием полученных значений строится аппроксимация $P_{p3}(h)$. В качестве высоты h_* , начиная с которой возможно разрушение ОЧ, можно, например, принять высоту, для которой вероятность $P_{p3}(h_*)$ пренебрежимо мала, например не превышает величины 10^{-3} .

Функция $\Delta R_{p3}(h)$ в общем случае зависит от размера района рассеивания фрагментов и его положения, а также от количества фрагментов и их характеристик. При определении $\Delta R_{p3}(h)$ можно принять, что центр рассеивания каждого фрагмента совпадает с центром общего района

рассеивания фрагментов, а среднее квадратичное отклонение соответствует эллипсу полного рассеивания для высоты первоначального разрушения ОЧ h . В этом случае вероятность поражения объекта фрагментами ОЧ может быть определена с использованием следующего соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta R_{p3}(h) &= 1 - \prod_{N_{\text{фр}}} (1 - \Delta R_{\text{фр}}^{(i)}(h)) \approx \\ &\approx \sum_{N_{\text{фр}}} \Delta R_{\text{фр}}^{(i)}(h) = N_{\text{фр}} \cdot \Delta R_{\text{фр}}(h), \end{aligned} \quad (5)$$

где $N_{\text{фр}}$ — количество образовавшихся фрагментов (обычно задаются некоторым предельным количеством фрагментов), $\Delta R_{\text{фр}}(h)$ — риск попадания фрагмента в зону поражения объекта.

Под зоной поражения объекта (ЗПО) понимается зона, при попадании в которую отделяющихся частей (фрагментов ОЧ) происходит поражение объекта. Например, в случае представления зоны поражения объекта в виде прямоугольника, ориентированного вдоль главных осей рассеивания ОЧ (рис. 3) величина $\Delta R_{\text{фр}}$ равна

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{фр}}(h) &= \left[\Phi \left(\frac{X_1 - m_X(h)}{\sigma_X(h)} \right) - \Phi \left(\frac{X_0 - m_X(h)}{\sigma_X(h)} \right) \right] \times \\ &\times \left[\Phi \left(\frac{Z_1 - m_Z(h)}{\sigma_Z(h)} \right) - \Phi \left(\frac{Z_0 - m_Z(h)}{\sigma_Z(h)} \right) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Phi(\cdot)$ — функция нормального распределения (функция Лапласа), $m_X(h)$, $m_Z(h)$ — центр группирования точек падения фрагментов ОЧ относительно центра выделенного района в случае разрушения ОЧ на высоте h , $\sigma_X(h)$, $\sigma_Z(h)$ — средние квадратичные отклонения, характеризующие рассеивание точек падения фрагментов ОЧ в продольном и боковом направлениях.

Для практических расчетов может быть использована кусочно-непрерывная аппроксимация функции $P_{p3}(h)$ для интервалов с концами $h_i = h_*, h_2, \dots, h_{N_h} = 0$ (N_h — количество интервалов разбиения высоты полета ОЧ первой ступени $[h_*, 0]$, где возможно ее разрушение). При этом вероятность разрушения ОЧ в пределах каждого интервала высот постоянна. Таким образом, составляющая риска поражения наземного объекта R_{p3} с учетом неопределенности высоты пер-

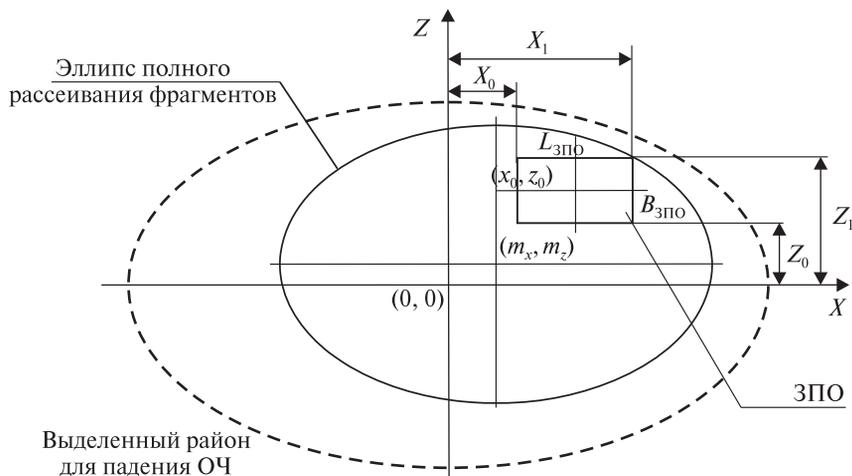


Рис. 3. Геометрическая модель для оценки риска поражения объекта, находящегося в районе падения отделяющихся частей

воначального разрушения ОЧ может быть определена как

$$R_{pz} = \sum_{i=1}^{N_h} P_{pz_i} \cdot \Delta R_{pz_i}, \quad (7)$$

где P_{pz_i} — вероятность разрушения ОЧ в интервале высот $[h_i, h_{i+1}]$,

$$\Delta R_{pz_i} = \frac{1}{h_*} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \Delta R_{pz}(h) dh.$$

При проведении практических расчетов для оценки ΔR_{pz_i} можно принять некоторое максимальное количество образовавшихся фрагментов ОЧ для высоты первоначального разрушения h_i .

Вторая составляющая в (2) — риск для объекта в случае отсутствия фрагментации ОЧ первой ступени на участке пассивного падения — будет определяться так

$$R_{npz} = P_{npz} \cdot \Delta R_{npz},$$

где

$$P_{npz} = 1 - \frac{1}{h_*} \int_0^{h_*} P_{pz}(h) dh —$$

вероятность падения неразрушенной ОЧ первой ступени, ΔR_{npz} — вероятность поражения объекта в случае падения неразрушенной ОЧ первой ступени, для которого можно использовать соотношение (6).

Покажем практическое использование предложенной модели. Исходя из концепции при-

емлемого риска, в качестве примера построим опасную зону для людей в районе падения ОЧ первой ступени для допустимого уровня индивидуального риска 10^{-6} , и сформулируем рекомендации по организации выделенного района для падения ОЧ.

Будем полагать, что разрушение ОЧ первой ступени РН на участке пассивного падения может начаться с высоты 30 км (здесь и далее данные носят иллюстративный характер). Вероятности P_{pz} первоначального разрушения ОЧ первой ступени в интервалах высот Δh , а также количество N и максимальный размер $l_{фр}$ фрагментов, представляющих опасность для людей, приведены в табл. 1.

Вероятность падения неразрушенной ОЧ первой ступени, исходя из данных табл. 1, составляет 0.1.

Характеристики рассеивания фрагментов по отношению к центру выделенного района падения ОЧ, полученного традиционными методами, приведены в табл. 2.

В случае падения неразрушенной ОЧ характеристики рассеивания точек падения равны $m_x = 14$ км, $m_z = 0$ км, $\sigma_x = 3$ км, $\sigma_z = 1.5$ км.

На рис. 4 показаны зоны падения фрагментов ОЧ для различных высот первоначального разрушения и границы выделенного района для падения ОЧ первой ступени, которые получаются

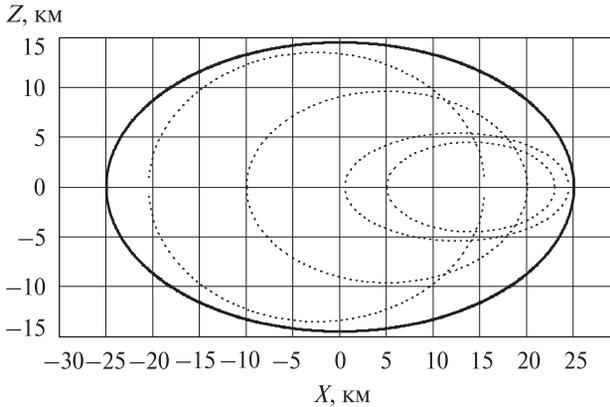


Рис. 4. Зоны падения фрагментов отделяющихся частей и границы выделенного района падения отделяющихся частей первой ступени

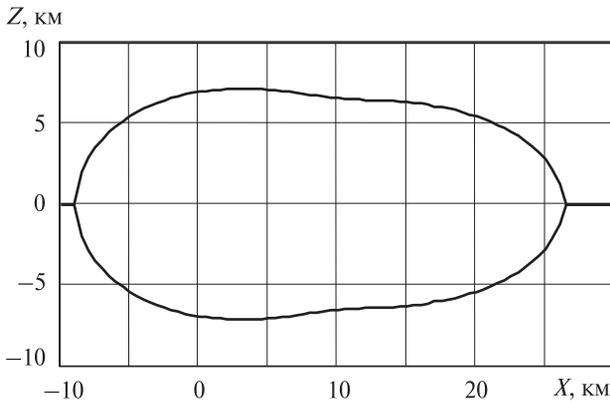


Рис. 5. Опасная зона для людей в районе падения отделяющихся частей I ступени

Таблица 1. Характеристики процесса разрушения отделяющихся частей первой ступени

Δh , км	P_{pz}	N	$l_{фр}$, м
30—20	0.1	30	4
20—10	0.3	20	
10—0	0.5	10	

Таблица 2. Характеристики районов падения фрагментов отделяющихся частей первой ступени для различных высот первоначальной фрагментации

h , км	m_x , км	m_z , км	σ_x , км	σ_z , км
30	-2.5	0	6	4.5
20	5.0	0	5	3.2
10	12.5	0	4	1.8

традиционным образом. Размеры такого района будут составлять ± 25 км на ± 14.5 км. Дополнительно будем предполагать, что на борту неразрушенной ОЧ первой ступени при ударе о землю остается 1.5 т ракетного топлива $O_2 + \text{керосин}$.

Зону поражения отдельного человека будем представлять в виде квадрата со стороной $2R_{пор}$, где $R_{пор}$ — радиус поражения для человека. При падении пассивного фрагмента радиус поражения в соответствии с табл. 1 составляет 4 м. Радиус поражения для людей при падении неразрушенной ОЧ первой ступени с остатками ракетного топлива определялись в соответствии с [3]. При этом уровень поражающего давления во фронте взрывной ударной волны для людей принят равным 1 Н/см^2 .

В районе падения ОЧ первой ступени построим сетку с шагом 100 м в продольном и поперечном направлениях и определим индивидуальный риск в узлах сетки согласно (2). Далее находится кривая, для точек которой риск в точности соответствует уровню допустимого риска 10^{-6} . Полученная таким образом опасная зона для людей приведена на рис. 5.

Сравнение зон, показанных на рис. 4 и 5, показывает, что опасная зона, где риск для людей превышает допустимый уровень, значительно меньше выделенного района для падения ОЧ первой ступени. При этом полученная опасная зона выходит за границы выделенного для падения ОЧ района, а следовательно, необходима организация дополнительных мероприятий по обеспечению безопасности. С другой стороны, значительная часть выделенного района не представляет опасности для людей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что наибольшая трудность при определении рисков поражения объектов в районах падения ОЧ связана с учетом возможной фрагментации ОЧ на участке пассивного падения.

Разработана математическая модель оценки риска поражения наземных объектов в районе падения ОЧ первой ступени с учетом неопределенности высоты первоначального разрушения. Использование предложенной модели в рамках

концепции приемлемого риска позволяет выдать рекомендации относительно организации специально выделенных районов падения ОЧ. В частности, такой подход может служить основой для обоснования сокращения размеров выделенных районов для падения ОЧ.

В заключение заметим, что полученные соотношения могут быть использованы для оценки риска поражения объектов в случае падения ОЧ верхних ступеней и створок головного обтекателя.

1. Гладкий Э. Г., Перлик В. И. Математические модели оценки риска для наземных объектов при пусках ракет-носителей // Космич. техн. Ракетное вооружение. — 2010. — Вып. 2. — С. 3—19.
2. Хенли Э., Дж. Куамато Х. Надежность технических систем и оценка риска / Под общ. ред. В. С. Сыромятникова. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.
3. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на ОПС: Справочное пособие. — М.: «Анкил», 2000.

Стаття надійшла до редакції 09.09.15

Е. Г. Гладкий

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН НЕБЕЗПЕКИ В РАЙОНАХ ПАДІННЯ ВІДОКРЕМЛЮВАНИХ ЧАСТИН РАКЕТИ-НОСІЯ З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИСОТИ ЇХНЬОГО ПЕРВІСНОГО РУЙНУВАННЯ

При штатному польоті ракети-носія основна небезпека для наземних об'єктів створюється в районах падіння відокремлюваних частин (ВЧ). Побудовано модель оцінки ризику для об'єктів у зоні падіння ВЧ з урахуванням невизначеності висоти її первісного руйнування. Показано практичне використання розробленої моделі для побудови зони небезпеки, у межах якої ризик для людей перевищує допустимий рівень. Отримана зона небезпеки дозволяє зробити більш коректним призначення розміру виділеного району для падіння ВЧ.

Ключові слова: ракета-носій, відокремлювана частина, висота первісного руйнування, фрагментація, район падіння, ризик ураження об'єкта, зона небезпеки.

E. G. Gladky

Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

DETERMINATION OF THE HAZARDOUS ZONES IN THE IMPACT AREAS OF SEPARATED PARTS OF LAUNCH VEHICLES UNDER THE UNCERTAIN ALTITUDE OF THEIR INITIAL DESTRUCTION

The main hazard for ground facilities during launch vehicle (LV) nominal flight is in the separated parts (SP) impact areas. SP impact areas are specially allocated to ensure safety along LV ground tracks. The paper deals with a risk assessment model for facilities in the SP impact area, which takes into account the uncertainty of the altitude of SP initial destruction. Practical use of the developed model for determining hazardous area, within which the risks for people exceed the allowable level, is described. We show that the obtained hazardous area allows more adequate determination of the size of allocated area for SP impact.

Key words: launch vehicle, separated part, altitude of initial destruction, fragmentation, impact area, risk of damage facility, hazardous area.