

<https://doi.org/10.15407/knit2020.03.032>

УДК 629.764.017.1

**Э. Г. ГЛАДКИЙ**

нач. сектора отдела, канд. техн. наук

E-mail: edgladky@gmail.com

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»

ул. Криворожская 3, Днепро, Украина, 49008

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЛЕКТИВНОГО РИСКА В СЛУЧАЕ АВАРИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «ЦИКЛОН-4М» НА ЭТАПЕ ПОЛЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В ВИДЕ МНОГОУГОЛЬНИКОВ**

---

*Подтверждение безопасности при пусках современных ракет-носителей (РН) требует определения уровня коллективного риска для населения вдоль трассы полета. Рассматриваются две процедуры оценки коллективного риска, в основе которых лежит представление населенных территорий с использованием выпуклых многоугольников.*

*Традиционные процедуры, используемые для определения коллективного риска для территории в пределах зоны падения аварийной РН, предполагают ее разбиение на типовые элементарные фигуры — сферические квадратики размером один градус по широте и долготе. Для них определяется коллективный риск и далее суммарное значение в пределах всей территории. При этом в пределы таких элементарных фигур могут попадать административные единицы различных государств с существенно отличающейся плотностью населения или незаселенные морские территории. В этой связи предложено оценивать коллективный риск непосредственно для административных единиц государств (провинций, департаментов, областей и т. п.), которые попадают в зону падения аварийной РН. Последние в расчетах представляются в виде выпуклого многоугольника или совокупности многоугольников, что позволяет приблизить расчетную зону населенной территории к реальности и тем самым повышает адекватность предложенной модели.*

*В зонах падения аварийных РН население чаще всего сосредоточено в населенных пунктах. Показаны недостатки традиционного подхода оценки коллективного риска для населенных пунктов в случае, когда аварийная РН достигает поверхности Земли без разрушения и соответственно зона поражения соизмерима или превосходит селитебную территорию населенного пункта. Рассмотрена процедура, основанная на представлении селитебной территории населенного пункта в виде многоугольника и определении площади его пересечения с зоной поражения аварийной РН. Для вычисления коллективного риска используется статистическое моделирование.*

*Показано практическое использование предложенных процедур в рамках разрабатываемого в Украине проекта ракетно-космического комплекса «Циклон-4М».*

**Ключевые слова:** *ракета-носитель, полетная безопасность, авария ракеты-носителя на этапе полета, зона падения, коллективный риск.*

---

Цитування: Гладкий Э. Г. Определение коллективного риска в случае аварии ракеты-носителя «Циклон-4М» на этапе полета с использованием представления населенных территорий в виде многоугольников. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 3 (124). С. 32—41. <https://doi.org/10.15407/knit2020.03.032>

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности при проведении пусков современных ракет-носителей (РН) является приоритетной задачей. В случае аварии РН на этапе полета безопасность рассматривается прежде всего в отношении населения и объектов, не связанных с космическими программами, которые будут находиться в зонах возможного падения РН. Используемая в настоящее время для обеспечения безопасности опасных объектов концепция «приемлемого риска» [3] позволяет факт попадания населенных территорий в пределы зоны падения аварийных РН не рассматривать как нарушение безопасности. Важно, чтобы не нарушались количественные требования к уровню риска для населения.

Для подтверждения безопасности миссии при проведении запусков космических аппаратов (КА) поставщику пусковых услуг (оператору пуска) или разработчику РН приходится оценивать показатели безопасности для населения в виде индивидуального и коллективного рисков в пределах зоны возможного падения аварийных РН. Индивидуальный риск характеризует риск поражения отдельного индивидуума в конкретной точке в пределах зоны падения аварийной РН, и его уровень для одного пуска традиционно не должен превышать  $10^{-6}$  [5, 6]. Коллективный риск характеризует общий (интегральный) уровень безопасности для населения в пределах определенной территории. Фактически он представляет среднее число погибших на некоторой территории при одном пуске РН и определяется из выражения

$$E_c = \bar{N}_{\text{пор}} = \iint_S \lambda(x, z) R(x, z) dx dz,$$

где  $R(x, z)$  — вероятность поражения аварийной РН человека, находящегося вблизи трассы в точке с координатами  $(x, z)$  от точки старта (индивидуальный риск),  $\lambda(x, z)$  — плотность населения в пределах элементарной площади  $dx \times dz$  с центром в точке  $(x, z)$ ,  $S$  — площадь рассматриваемой населенной территории.

Традиционно коллективный риск определяется для населенных территорий, которые попадают в зону падения аварийных РН (территории вдоль всей трассы полета РН на поверхности

Земли) до выхода верхней ступени РН или разгонного блока на замкнутую орбиту. При этом суммарный коллективный риск для населения не должен превышать  $10^{-4}$  [5, 6].

Зоны падения аварийных РН (очень часто их называют полетными коридорами) формируются в результате срабатывания бортовой системы безопасности полета. Традиционно РН разработки ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» оснащаются автоматической бортовой системой безопасности полета, которая в случае выявления аварийной ситуации на борту РН в полете обеспечивает аварийное выключение двигателя.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения коллективного риска (именно на этот показатель ориентируются в процессе анализа полетной безопасности) на некоторой населенной территории в общем случае рекомендовано использовать соотношение [6]

$$E_c = \sum_{N_{\text{фр}}} \sum_{N_{\Delta t}} P_{\text{НТ}} \cdot S_{\text{пор}} \cdot \lambda, \quad (1)$$

где  $N_{\text{фр}}$  — количество фрагментов аварийной РН, достигающих поверхности Земли,  $N_{\Delta t}$  — количество интервалов разбиения времени полета ступени РН (интервалы времени между моментами возникновения аварийных отказов, приводящих к прекращению полета),  $P_{\text{НТ}}$  — вероятность падения фрагмента аварийной РН в пределы рассматриваемой населенной территории при возникновении аварии в интервале времени  $\Delta t$ ,  $S_{\text{пор}}$  — площадь поражения фрагмента, достигающего поверхности Земли,  $\lambda$  — плотность населения в пределах рассматриваемой территории.

При проведении практических расчетов суммарного коллективного риска рекомендуется [4] зону падения аварийной РН разбивать на элементарные фигуры, в качестве которых традиционно используют сферические квадратики  $1^\circ \times 1^\circ$  по долготе и широте. Затем с использованием данных о плотности населения в указанных элементарных квадратах (данные доступны на специализированных сайтах в интернете) определяют уровень коллективного риска. В итоге суммарный коллективный риск для зоны

падения аварийных РН определяется как

$$E_{c\Sigma} = \sum_N E_{ci}, \quad (2)$$

где  $E_{ci}$  — значение коллективного риска для элементарных квадратиков, которые попадают в аварийную зону трассы пуска,  $N$  — суммарное количество элементарных квадратиков, которые накрываются зоной падения аварийных РН.

Такому подходу присущи определенные недостатки. Указанные элементарные квадратики имеют достаточно большие размеры (могут превышать размеры зон падения аварийных РН после аварийного выключения двигателя), и в их пределах могут находиться различные административные единицы одного или нескольких государств, в пределах которых плотности населения могут существенно различаться. Более того, в пределах указанных элементарных квадратиков могут находиться морские территории, где население отсутствует.

Таким образом, более целесообразным представляется использование процедуры оценки коллективного риска только для территорий на суше с учетом плотности населения для различных участков суши.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения процедуры оценки коллективного риска зону падения аварийных РН разобьем на участки по территориальной принадлежности тому или иному государству и по соответствующему административному территориальному делению. Таким образом, суммарный коллективный риск для населенных территорий, попадающих в зону падения аварийных РН, по-прежнему будет определяться формулой (2), в которой составляющие  $E_{ci}$  представляют уровни коллективного риска для административных единиц (провинции, департаменты, области и т. п.) государств, которые попадают в аварийную зону трассы пуска, а  $N$  — соответственно суммарное количество таких административных единиц. В глобальной сети интернет могут быть найдены достоверные данные о количестве населения и его плотности в пределах рассматриваемых административных единиц государств.

Для получения более корректных оценок коллективного риска административные единицы государств, которые попадают в зону падения аварийных РН, целесообразно представлять в виде одного или нескольких выпуклых многоугольников [1]. Необходимо отметить, что в общем случае зона любого наземного объекта, находящегося в пределах аварийной зоны трассы пуска, может быть представлена в виде выпуклого многоугольника или совокупности выпуклых многоугольников. На поверхности Земли координаты вершин многоугольников будут задаваться в виде широты и долготы ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ). Последние могут быть получены с использованием имеющихся у разработчика РН электронных атласов, например электронного атласа Google Earth (находится в сети интернет в открытом доступе). Такой подход фактически позволяет с большой точностью в расчетах отразить реальную конфигурацию населенных территорий, попадающих в аварийную зону трассы пуска.

Использование стандартной процедуры оценки коллективного риска требует определения вероятности падения аварийной РН или ее фрагментов в пределы каждого многоугольника ( $P_{HT}$ ). Указанная вероятность в случае отказа РН в интервале  $\Delta t$  будет определяться как

$$P_{HT} = Q \cdot P_{\Delta t} \frac{1}{t_j - t_{j-1}} \int_{t_{j-1}}^{t_j} P_{HT}(t) dt, \quad (3)$$

где  $Q$  — вероятность аварийного отказа РН на этапе полета ступени,  $P_{\Delta t}$  — вероятность возникновения аварийного отказа в интервале времени  $\Delta t$ ,  $P_{HT}(t)$  — вероятности падения аварийной РН или ее фрагментов в пределы каждого многоугольника в случае аварии в момент времени  $t$  (точнее, в пределах элементарного интервала  $dt$ ). Для определения  $P_{HT}(t)$  необходимо определить координаты вершин многоугольника в стартовой системе координат с началом в точке старта РН и осью  $X$ , совпадающей с направлением пуска (совпадает с аварийной трассой), т. е. в виде дальности от точки старта ( $x$ ) и удаленности от трассы ( $z$ ), осуществив переход

$$(\varphi_i, \lambda_i) \rightarrow (x_i, z_i) \text{ для } i = \overline{1, N_{HT}},$$

где  $N_{HT}$  — количество вершин многоугольника, описывающего рассматриваемую населенную территорию.

Координаты точек многоугольника в стартовой системе координат могут быть определены с использованием формул сферической геометрии. Способ определения указанных координат с использованием аварийной трассы предложен автором в работе [1]. Там же показан способ определения вероятности попадания аварийной РН (или ее фрагментов) в пределы выпуклых многоугольников, для чего проводится декомпозиция выпуклого многоугольника в виде совокупности треугольников (рис. 1):

$$P_{HT}(t) = \sum_{N_{HT}-2} P_{\Delta i}(t), \quad (4)$$

где  $P_{\Delta i}(t)$  — вероятность попадания аварийной РН (или ее фрагментов) в пределы  $i$ -го треугольника.

Для каждого момента времени аварийного прекращения полета вероятность попадания аварийной РН (или ее фрагментов) в пределы треугольника может быть определена по формуле

$$P_{\Delta}(t) = \iint_{\Delta} f_{X,Z}(x, z; m_X(t), m_Z(t), \sigma_X(t), \sigma_Z(t)) dx dz, \quad (5)$$

где  $f_{X,Z}(x, z; \bullet)$  — функция плотности СВ точек падения аварийной РН или ее фрагмента,  $m_X(t)$ ,  $m_Z(t)$ ,  $\sigma_X(t)$ ,  $\sigma_Z(t)$  — центры рассеивания и средние квадратичные отклонения разброса точек падения аварийной РН (ее фрагментов) в продольном и боковом направлениях для момента времени возникновения аварии  $t$ .

Традиционно разбросы точек падения аварийных РН и ее фрагментов в продольном и боковом направлениях полагаются независимыми и следующими нормальному закону, вследствие чего вычисление интеграла (5) не представляет существенных трудностей.

Представленный подход был использован специалистами ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» для оценки суммарного уровня коллективного риска для территории Южной Америки, которая попадала в зону падения фрагментов аварийной РН в рамках разрабатываемого проекта «Циклон-4М». На рис. 2 показана зона падения аварийной РН «Циклон-4М» для траектории выведения КА

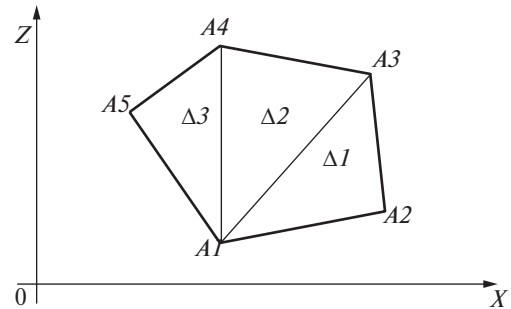


Рис. 1. Представление многоугольника в виде набора треугольников

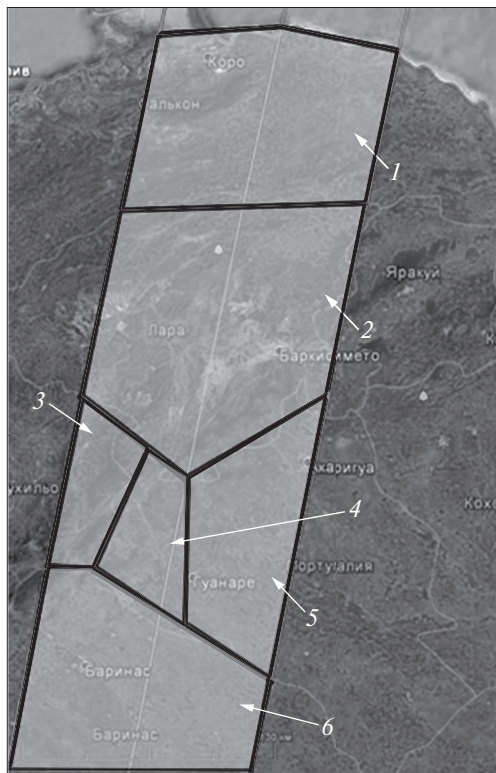


Рис. 2. Зона падения аварийной РН «Циклон-4М»: 1 — аварийная трасса, 2 и 3 — соответственно левая и правая 3σ-границы зоны падения

массой 3400 кг на солнечно-синхронную орбиту. Падение фрагментов аварийной РН на территорию Южной Америки возможно в случае отказа на этапе полета второй ступени.

В пределах указанной зоны падения аварийной РН «Циклон-4М» были определены административные единицы государств, территории которых далее были представлены в виде многоугольников. В качестве примера на рис. 3 показана наиболее заселенная территория Венесуэлы, которая была представлена многоуголь-





**Рис. 3.** Представление административных единиц в пределах зоны падения аварийной РН «Циклон-4М» на территории Венесуэлы: 1 — штат Фалькон, 2 — штат Лара, 3 — штат Трухильо, 4, 5 — штат Португеса, 6 — штат Баринас

**Таблица 1.** Вычисленные значения коллективного риска  $E_c$  для административных единиц государств, попадающих в зону падения аварийных РН «Циклон-4М»

Государство	Административная единица	Средняя плотность населения, чел./км <sup>2</sup>	$E_c$
Венесуэла	Штат Фалькон	36.35	$2.19 \cdot 10^{-9}$
	Штат Лара	84.18	$7.84 \cdot 10^{-9}$
	Штат Трухильо	20.29	$6.32 \cdot 10^{-9}$
	Штат Португеса	57.46	$1.68 \cdot 10^{-9}$
	Штат Баринас	21.49	$1.26 \cdot 10^{-9}$
	Штат Апуре	6.19	$1.33 \cdot 10^{-10}$

Окончание табл. 1

Государство	Административная единица	Средняя плотность населения, чел./км <sup>2</sup>	$E_c$
Колумбия	Департамент Араука	8.76	$1.97 \cdot 10^{-10}$
	Департамент Касанаре	6.33	$1.77 \cdot 10^{-10}$
	Департамент Вичада	0.55	$5.53 \cdot 10^{-14}$
	Департамент Мета	9.22	$1.48 \cdot 10^{-10}$
	Департамент Гуайния	0.6	$8.21 \cdot 10^{-13}$
	Департамент Гуавьяре	2.49	$8.92 \cdot 10^{-11}$
	Департамент Ваупес	0.5	$5.54 \cdot 10^{-12}$
	Департамент Какета	4.55	$3.54 \cdot 10^{-11}$
	Департамент Амасонас	0.51	$3.16 \cdot 10^{-11}$
	Регион Лорето	2.42	$1.72 \cdot 10^{-11}$
	Регион Укаяли	4.0	$1.58 \cdot 10^{-10}$
	Регион Хуни	29.0	$6.50 \cdot 10^{-11}$
Бразилия	Штат Амазонас	2.23	$3.60 \cdot 10^{-11}$
	Штат Акри	4.47	$9.38 \cdot 10^{-11}$
	Регион Уанкавелика	20.2	$1.11 \cdot 10^{-10}$
	Регион Аякучо	14.1	$8.81 \cdot 10^{-11}$
Перу	Регион Ика	31.2	$2.63 \cdot 10^{-11}$
	Регион Арекипа	18.0	$7.11 \cdot 10^{-11}$

Примечание. Количество значений в ячейках  $E_c$  соответствует количеству выпуклых многоугольников, на которые разбита соответствующая административная единица.

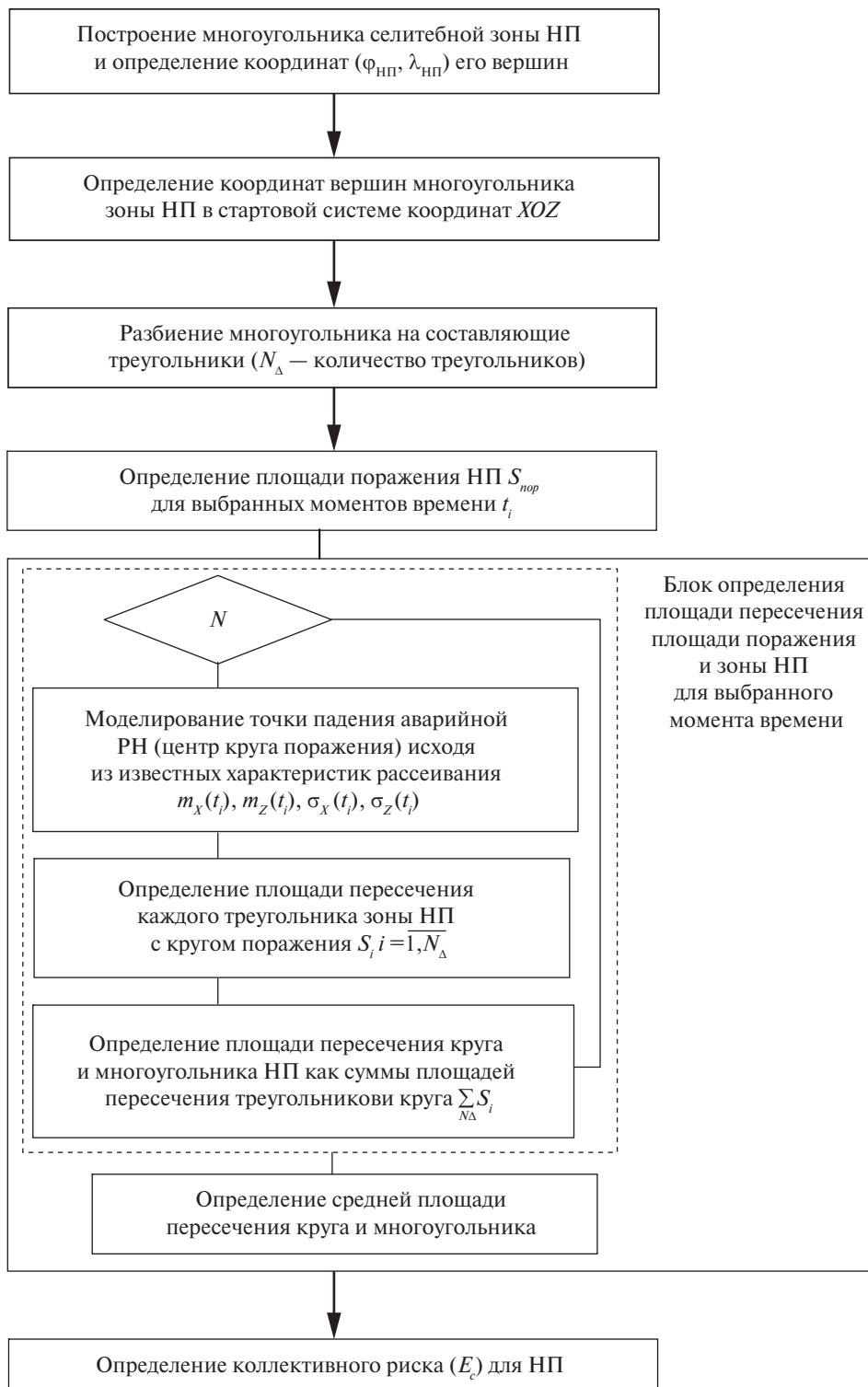


Рис. 4. Блок-схема определения коллективного риска для населенного пункта (НП), находящегося в зоне падения аварийной РН

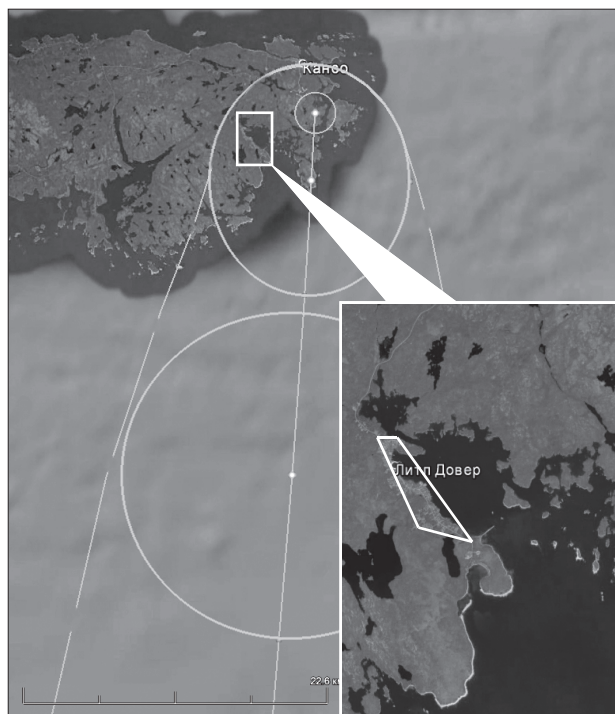


Рис. 5. Провинция Новая Шотландия (Канада), которая попадает в зону падения аварийных РН «Циклон-4М»

Таблица 2. Значения коллективного риска  $E_c$  для государств Южной Америки, территории которых попадают в зону падения фрагментов аварийной РН «Циклон-4М»

Государства Южной Америки	$E_c$
Венесуэла	$1.37 \cdot 10^{-8}$
Колумбия	$8.40 \cdot 10^{-10}$
Бразилия	$2.36 \cdot 10^{-10}$
Перу	$1.49 \cdot 10^{-9}$
В целом	$1.74 \cdot 10^{-8}$

никами в соответствии с административным делением. Прогнозируемая оценка надежности РН «Циклон-4М» на этапе полета второй ступени составляет 0.98 (соответственно вероятность аварийного отказа 0.02). В расчетах принимался равномерный закон распределения возникновения отказов по времени полета каждой ступени. В случае аварии РН «Циклон-4М» на этапе полета второй ступени, учитывая значительную

высоту полета, поверхности Земли может достигать не более 10...20 фрагментов, выполненных из жаростойких материалов. При этом предполагалось, что средняя площадь поражения каждого фрагмента не превосходит  $1 \text{ м}^2$ . Результаты расчетов значений коллективного риска для административных единиц государств, которые попадают в зону падения аварийной РН, представлены в табл. 1.

В соответствии с данными табл. 1 значения коллективного риска для территории государств Южной Америки, полученные с использованием (2), приведены в табл. 2.

В рамках общей задачи оценки коллективного риска интерес также представляет оценка коллективного риска для населенных пунктов или городских агломераций, где чаще всего и сосредотачивается значительная часть населения рассматриваемых регионов. Для такой оценки также может быть использована рассмотренная выше стандартная процедура с представлением селитебных территорий населенных пунктов в виде многоугольника (совокупности многоугольников). В то же время применение традиционного подхода встречает определенные трудности в случае, когда аварийная РН достигает поверхности Земли без разрушения (характерно для аварий РН на начальном этапе полета). Для небольших населенных пунктов, которые, скорее всего, будут располагаться в зонах падения неразрушенных аварийных РН, площадь поражения аварийной РН может быть соизмерима или даже превосходить площадь селитебной территории населенного пункта. Это приведет к погрешности при вычислении коллективного риска согласно (1). Для этого случая в работе [2] предложена процедура, использующая статистическое моделирование, и основанная на определении площади пересечения многоугольника площади селитебной территории населенного пункта и зоны поражения аварийной РН (представляется в виде круга и определяется факторами взрыва). Для этого разработана стандартная процедура определения площади пересечения треугольника и круга. Блок-схема общей процедуры определения коллективного риска для населенного пункта показана на рис. 4.

Указанная процедура была использована для оценки коллективного риска для небольшого населенного пункта, находящегося в районе точки старта РН «Циклон-4М». Начальный участок полета РН «Циклон-4М» проходит над территорией Канады, провинция Новая Шотландия (рис. 5). На указанных территориях практически отсутствует население. В то же время в пределы зоны падения аварийной РН «Циклон-4М» попадает небольшой населенный пункт Литл Довер с населением около 400 человек.

С использованием электронного атласа GoogleEarth была построена расчетная селитебная территория Литл Довер в виде многоугольника, площадь которого составила 0.75 км<sup>2</sup>. В случае аварии на этапе полета возможно падение в пределах указанного населенного пункта неразрушенной аварийной РН «Циклон-4М». Радиус поражения при падении аварийной РН определялся факторами взрыва, и прежде всего

ударной волной. С использованием предложенной методики уровень коллективного риска для Литл Довер составил  $6.3 \cdot 10^{-7}$ .

## ВЫВОДЫ

В статье рассмотрены процедуры оценки коллективного риска с использованием представления населенных территорий (административных единиц государств, населенных пунктов) на суше в виде выпуклых многоугольников. Такое представление позволяет более корректно построить расчетные модели для оценивания коллективного риска.

Предложенные процедуры были использованы для анализа полетной безопасности разрабатываемого КРК «Циклон-4М». Полученные результаты показали, что уровень коллективного риска для населенных территорий, которые попадают в зону падения аварийных РН «Циклон-4М», является приемлемым и не превышает установленных предельных значений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гладкий Э. Г. Процедура оценки полетной безопасности ракет-носителей, использующая геометрическое представление зоны поражения объекта в виде многоугольника. *Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. тр.* 2015. Вып. 3. С. 50—56.
2. Гладкий Э. Г. К вопросу оценки коллективного риска для населенных пунктов в случае аварии ракеты-носителя на этапе полета первой ступени. *Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов.* 2018. Вып. 1 (93). С. 65—78.
3. Хенли Э., Джм Кумамото Х. *Надежность технических систем и оценка риска.* М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
4. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C — Licensing, part 420 License to Operate a Launch Site. 2000. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-420> (дата звернения: 10.10.2019).
5. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C — Licensing, part 417 — Launch Safety, 2001. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-417> (дата звернения: 10.10.2019).
6. AFSPCMAN 91-710 Range Safety User Requirements. Vol. 1. 2016. URL: <http://static.e-publishing.af.mil/production/1/afspc/publicating/afspcman91-710v1/afspcman91-710v1.pdf> (дата звернения: 10.10.2019).

Статья надійшла до редакції 10.10.2019

## REFERENCES

1. Hladkii E. H. (2015). Assessment procedure of the flight safety for launch vehicles using the geometric representation of the damage area in the form of a polygon. *Space technology. Missile armaments*, 3, 50—56 [in Russian].
2. Hladkii E. H. (2018). On the issue of collective risk assessment for settlements in the event of a launch vehicle accident at the first-stage flight phase. *Issues of designing and manufacturing aircraft structures*, 1(93), 65—78 [in Russian].
3. Henley E., Kumamoto H. (1981). *Reliability Engineering and Risk Assessment*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
4. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C — Licensing, part 420 License to Operate a Launch Site. 2000. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-420> (Last accessed: 10.10.2019).



5. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C – Licensing, part 417 – Launch Safety, 2001. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-417> (Last accessed: 10.10.2019).
6. AFSCPMAN 91-710 Range Safety User Requirements. Volume 1. 2016. URL: <http://static.e-publishing.af.mil/production/1/afspc/publicating/afspcman91-710v1/afspcman91-710v1.pdf> (Last accessed: 10.10.2019).

*Received 10.10.2019*

*Е. Г. Гладкий*

нач. сектору відділу, канд. техн. наук

E-mail: edgladky@gmail.com

ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»

вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

#### ВИЗНАЧЕННЯ КОЛЕКТИВНОГО РИЗИКУ У ВИПАДКУ АВАРІЇ РАКЕТИ-НОСІЯ «ЦИКЛОН-4М» НА ДІЛЯНЦІ ПОЛЬОТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗОБРАЖЕННЯ НАСЕЛЕНИХ ТЕРИТОРІЙ БАГАТОКУТНИКАМИ

Підтвердження безпеки під час пусків сучасних ракет-носіїв (РН) вимагає визначення рівня колективного ризику для населення вздовж траси польоту. Розглядаються дві процедури оцінювання колективного ризику, основу яких складає зображення населених територій з використанням опуклих багатокутників.

Традиційні процедури, що використовуються для визначення колективного ризику для території у межах зони падіння аварійної РН, передбачають її розбиття на типові елементарні фігури — сферичні квадратики розміром один градус за широтою і довготою. Для них визначається колективний ризик та сумарне значення у межах всієї території. При цьому у межі таких елементарних фігур можуть потрапляти адміністративні одиниці різних держав із суттєво відмінною густиною населення або незаселені морські території. Виходячи з цього, запропоновано оцінювати колективний ризик безпосередньо для адміністративних одиниць держав (провінцій, департаментів, областей тощо), які потрапляють у зону падіння аварійної РН. Останні в розрахунках подають у вигляді опуклого багатокутника або сукупності багатокутників, що дозволяє наблизити розрахункову зону населеної території до реальності і відповідно підвищує адекватність запропонованої моделі.

В зонах падіння аварійних РН населення зазвичай зосереджене у населених пунктах. Показано недоліки традиційного підходу оцінювання колективного ризику для населених пунктів у випадку, коли аварійна РН досягає поверхні Землі без руйнування, і відповідно зона ураження сумірна або перевищує сельбищну територію населеного пункту. Розглянуто процедуру, що заснована на зображенні сельбищної території населеного пункту у вигляді багатокутника і визначенні площі його перетину із зоною ураження аварійної РН. Для розрахунку колективного ризику використано статистичне моделювання.

Показано практичне застосування запропонованих процедур для проекту ракетно-космічного комплексу «Циклон-4М», що розробляється в Україні.

**Ключові слова:** ракета-носій, польотна безпека, аварія ракети-носія на етапі польоту, зона падіння, колективний ризик.

*E. G. Gladkyi*

Head of Department, Cand. Sci. in Tech.

E-mail: edgladky@gmail.com

Yuzhnoye State Design Office

3 Krivorizka Str., Dnipro, 49008, Ukraine

DETERMINATION OF THE COLLECTIVE RISK IN A CASE  
OF A LAUNCH VEHICLE «CYCLON-4M» CRASH DURING THE FLIGHT PHASE  
USING POLYGON IMAGES TO REPRESENT POPULATED AREAS

Safety confirmation during launches of contemporary launch vehicles (LV) requires the determination of the level of the collective risk for the population along the flight route. The article considers two collective risk assessment procedures based on the representation of populated areas by convex polygons.

Traditional procedures, used for determination of the collective risk for territories within the emergency LV fall area, divide the area into typical elementary figures — spherical squares of one-degree size along the latitude and longitude. The collective risk is determined for the squares, and then the total value is obtained for the whole territory. These elementary figures may signify administrative districts of various states with significantly different population density as well as unpopulated sea territories. Therefore, it is proposed to assess the collective risk directly for administrative districts of states (provinces, districts, regions, etc.), which lie within the emergency LV fall area. For calculations, these districts are represented as a convex polygon or totality of convex polygons that allow approximating the computational area of the populated territory to the reality and increasing the adequacy of the proposed model.

In the areas of emergency LV fall, the population is usually concentrated in settlements. The limitations of traditional approaches to the assessment of the collective risk for the settlements are shown for cases when emergency LV reaches the surface of the Earth without being destroyed and, consequently, the damaged area is comparable or exceeds the settlement's housing territory. The presented procedure is based on the representation of the settlement's housing territory as a polygon and the determination of the area of its intersection with the emergency LV damaged area. Statistical simulation is used to compute the collective risk.

The practical usage of the proposed procedures is shown in the context of the Cyclone-4M space launch system developed in Ukraine.

**Keywords:** launch vehicle, flight safety, accident of launch vehicle on flight phase, fall area, collective risk.