

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ КОЛЛЕКТИВНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В СЛУЧАЕ АВАРИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА ЭТАПЕ ПОЛЕТА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ

В настоящее время в связи с возросшей интенсивностью космических запусков и процессами глобализации обеспечение безопасности при пусках ракет-носителей (РН) представляет собой актуальную задачу. Традиционно трассы пусков РН стараются прокладывать таким образом, чтобы они проходили на достаточном удалении от населенных территорий и объектов, падение на которые недопустимо. К сожалению, для имеющихся космодромов обеспечить выполнение указанного требования в полном объеме для используемых или перспективных трасс полета РН проблематично. Вследствие этого в зоне возможного падения аварийных РН будут присутствовать населенные территории.

Для населенных территорий, которые попадают в зону падения аварийной РН, согласно международным нормам безопасности [1] следует оценивать показатель коллективного риска (E_c), который фактически представляет собой среднее число погибших на этих территориях. При определении требований к уровню коллективного риска разработчики РН обычно ориентируются на требования Федерального авиационного управления (FAA) США и требования безопасности Восточного и Западного полигонов США [2, 3]. Допустимый уровень для коллективного риска на один пуск РН установлен равным $30 \cdot 10^{-6}$.

Поскольку в пределах населенных территорий большая часть людей проживает в населенных пунктах, интерес, в первую очередь, представляет оценка коллективного риска для населенных пунктов, попадающих в зону падения аварийных РН.

Оценку коллективного риска для людей в пределах некоторой населенной территории и, в частности, в населенном пункте (НП) E_c рекомендуется проводить с использованием следующего общего соотношения [2, 3]:

$$E_c = \sum_{N_{\phi p}} \sum_{N_{\Delta t}} P_{НП} \cdot S_{пор} \cdot \lambda, \quad (1)$$

где $N_{\phi p}$ – количество фрагментов аварийной РН, достигающих поверхности земли; $N_{\Delta t}$ – количество интервалов разбиения времени полета ступени РН (интервалы времени между моментами аварии РН); $P_{НП}$ –

вероятность падения фрагмента в пределы селитебной территории НП; $S_{пор}$ – площадь поражения фрагмента, достигающего поверхности земли; λ – плотность населения в пределах селитебной территории рассматриваемого НП.

Выскажем ряд замечаний относительно соотношения (1). Во-первых, оно рекомендуется для оценки коллективного риска E_c независимо от времени аварии РН [2]. В то же время для аварий РН, которые могут произойти на этапе полета первой ступени, использование (1) может давать определенную погрешность. Чтобы продемонстрировать это, выражение, содержащееся в двойной сумме (1), запишем в следующем виде

$$P_{НП} \cdot \frac{S_{пор}}{S_{НП}} \cdot N_{жит}, \quad (2)$$

где $S_{НП}$ – площадь селитебной территории НП; $N_{жит}$ – количество проживающих в НП жителей.

Отношение площадей $\frac{S_{пор}}{S_{НП}}$ в выражении (2) может рассматриваться как условная вероятность поражения одного человека, случайным образом находящегося в пределах рассматриваемого НП, при условии попадания на его селитебную территорию аварийной РН.

В случае аварии на этапе полета первой ступени аварийная РН может достигать поверхности земли без разрушения или разрушившись на крупные фрагменты, представляющие собой отдельные ступени. В последнем случае разрушение корпуса РН на участке пассивного падения происходит по линиям технологического членения. При ударе неразрушенной аварийной РН (или ее ступени с топливом) о поверхность земли будет происходить разрушение конструкции, смешивание компонентов ракетного топлива и взрыв, сопровождаемый ударной волной, пожаром, возможно токсическим загрязнением приземного слоя воздуха, если на борту РН используются токсичные компоненты, такие, как АТ и НДМГ. В результате зона поражения при падении аварийной РН (или ее ступени) будет иметь значительные размеры и может быть соизмерима с площадью селитебной территории НП (или превышать ее) с учетом того, что по трассе пуска первой ступени, скорее всего, могут быть расположены небольшие населенные пункты.

Исходя из этого отношение $\frac{S_{пор}}{S_{НП}}$ может быть больше единицы, и соот-

ветственно условная вероятность поражения одного человека в НП будет близка к единице. При этом поражение людей в НП возможно и в том случае, когда точка падения аварийной РН будет находиться вне границ его селитебной территории (на расстоянии, не превышающем радиус поражения). Исходя из этого формула (2) и соответствующая ей (1) будут давать погрешность.

Таким образом, формула (1) должна применяться в том случае, когда площадь селитебной территории НП значительно больше площади поражения при падении РН или ее фрагмента. Такая ситуация характерна для случая разрушения корпуса аварийной РН на участке пассивного падения, когда поверхности земли достигают инертные фрагменты, не содержащие ракетного топлива.

Во-вторых, при определении в (1) вероятности $P_{НП}$ в [1] рекомендуется селитебную территорию НП представлять в виде типовой фигуры - круга (или прямоугольника), размеры которого будут всегда больше реальных размеров.

Теперь покажем, каким образом могут быть получены соотношения для оценки E_c , которые позволяют учесть реальную конфигурацию селитебной территории НП, а также возможные значительные размеры зоны поражения, которые могут реализоваться при падении аварийной РН или ее фрагментов. Для определенности будем рассматривать оценку коллективного риска для НП в случае аварии РН на этапе полета первой ступени, когда происходит падение неразрушенной аварийной РН.

В статье [4] предложено зону любого наземного объекта (в нашем случае селитебную территорию НП), находящегося в пределах зоны падения аварийной РН, представлять в виде выпуклого многоугольника (рис. 1). Координаты вершин такого многоугольника на поверхности Земли (широта φ и долгота λ) могут быть получены с использованием имеющихся электронных атласов, например электронного атласа Google Earth.

Далее необходимо получить координаты вершин многоугольника селитебной территории НП в стартовой системе координат с началом в точке старта РН и осью X , направленной в направлении пуска, то есть в виде дальности от точки старта (x) и удаленности от трассы полета (z). Таким образом, необходимо осуществить переход:

$$(\phi_{НПi}, \lambda_{НПi}) \rightarrow (x_{НПi}, z_{НПi}) \text{ для } i = \overline{1, N_{НП}},$$

где $N_{НП}$ – количество вершин многоугольника, описывающего селитебную территорию НП.



Рисунок 1 – Представление селитебной зоны населенного пункта в виде выпуклого многоугольника ($A_1 - A_5$)

Процедура определения координат многоугольника, описывающего селитебную территорию НП ($x_{НПi}, z_{НПi}$) для $i = \overline{1, N_{НП}}$, с использованием аварийной трассы может быть заимствована из [4]. Попутно заметим, что площадь такого многоугольника может быть определена как сумма составляющих его треугольников

$$S_{НП} = \frac{1}{2} \left(\begin{vmatrix} x_{НП1} & z_{НП1} & 1 \\ x_{НП2} & z_{НП2} & 1 \\ x_{НП3} & z_{НП3} & 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_{НП1} & z_{НП1} & 1 \\ x_{НП3} & z_{НП3} & 1 \\ x_{НП4} & z_{НП4} & 1 \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} x_{НП1} & z_{НП1} & 1 \\ x_{НП(N_{НП}-1)} & z_{НП(N_{НП}-1)} & 1 \\ x_{НП(N_{НП})} & z_{НП(N_{НП})} & 1 \end{vmatrix} \right).$$

Общее соотношение для оценки коллективного риска для людей в НП (по аналогии с формулой для оценки вероятности падения аварийной РН в зону поражения объекта [5]) можно записать так:

$$E_c = Q \sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} P_{\Delta t_j} \frac{1}{t_k} \int_{t_{j-1}}^{t_j} N_{пор}(t) dt, \quad (3)$$

где Q – вероятность возникновения аварии РН (аварийного отказа) на этапе полета первой ступени; $P_{\Delta t_j}$ – вероятность возникновения ава-

рийного отказа, приводящего к аварии РН, в j -м интервале времени полета $[t_{j-1}, t_j]$; $N_{пор}(t)$ – количество пораженных в НП при возникновении аварии РН в момент времени t ; t_k – полное время работы ступени.

Для фиксированного момента времени аварии РН t количество погибших на территории рассматриваемого НП может быть определено следующим образом:

$$N_{пор} = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{пор}(x, z) f(x, z; m_x, m_z, \sigma_x, \sigma_z) dx dz, \quad (4)$$

где $S_{пор}(x, z)$ – пораженная площадь НП при падении аварийной РН (площадь пересечения зоны поражения при падении аварийной РН и селитебной территории НП) в случае падения аварийной РН в точке (x, z) ; $f(x, z; m_x, m_z, \sigma_x, \sigma_z)$ – плотность распределения точек падения аварийных РН по дальности и в боковом направлении; $m_x, m_z, \sigma_x, \sigma_z$ – центры рассеивания и средние квадратические отклонения точек падения аварийных РН в продольном и боковом направлениях для момента t .

Поскольку в подавляющем большинстве случаев отклонения точек падения аварийной РН в продольном и боковом направлениях считаются независимыми, формулу (4) можно переписать в виде

$$N_{пор} = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{пор}(x, z) f_x(x; m_x, \sigma_x) f_z(z; m_z, \sigma_z) dx dz, \quad (5)$$

где $f_x(x; m_x, \sigma_x)$ и $f_z(z; m_z, \sigma_z)$ – плотности распределения точек падения аварийных РН в продольном и боковом направлениях соответственно, в качестве которых обычно выбираются нормальные законы.

Необходимо отметить, что двойной интеграл в (4) и (5) представляет собой математическое ожидание пораженной площади НП.

Непосредственное использование (5) на практике затруднительно, поскольку связано с необходимостью построения функции $S_{пор}(x, z)$. В нашем случае она будет представлять собой площадь пересечения зоны поражения, образующейся при падении неразрушенной аварийной РН, которую можно представить в виде круга (радиус зависит от момента аварии РН), а также выпуклого многоугольника, описывающего селитебную территорию.

Решение интеграла (5) для любого момента аварии РН может быть получено с использованием метода статистического моделирования, при этом для каждой реализации точки падения аварийной РН необходимо получить величину $S_{пор}(x, z)$.

Определить площадь пересечения круга поражения и многоугольника НП для каждой реализации точки падения аварийной РН в общем случае проблематично, поскольку существует большое количество вариантов их взаимного пересечения. Для решения указанной задачи разобьем многоугольник НП на составляющие его треугольники. Количество таких треугольников (N_{Δ}) будет равно

$$N_{\Delta} = N_{НП} - 2.$$

Теперь общую площадь пересечения круга и многоугольника (заштрихованная часть на рис. 2) можно определить как сумму площадей пересечения круга и треугольников, составляющих многоугольник.

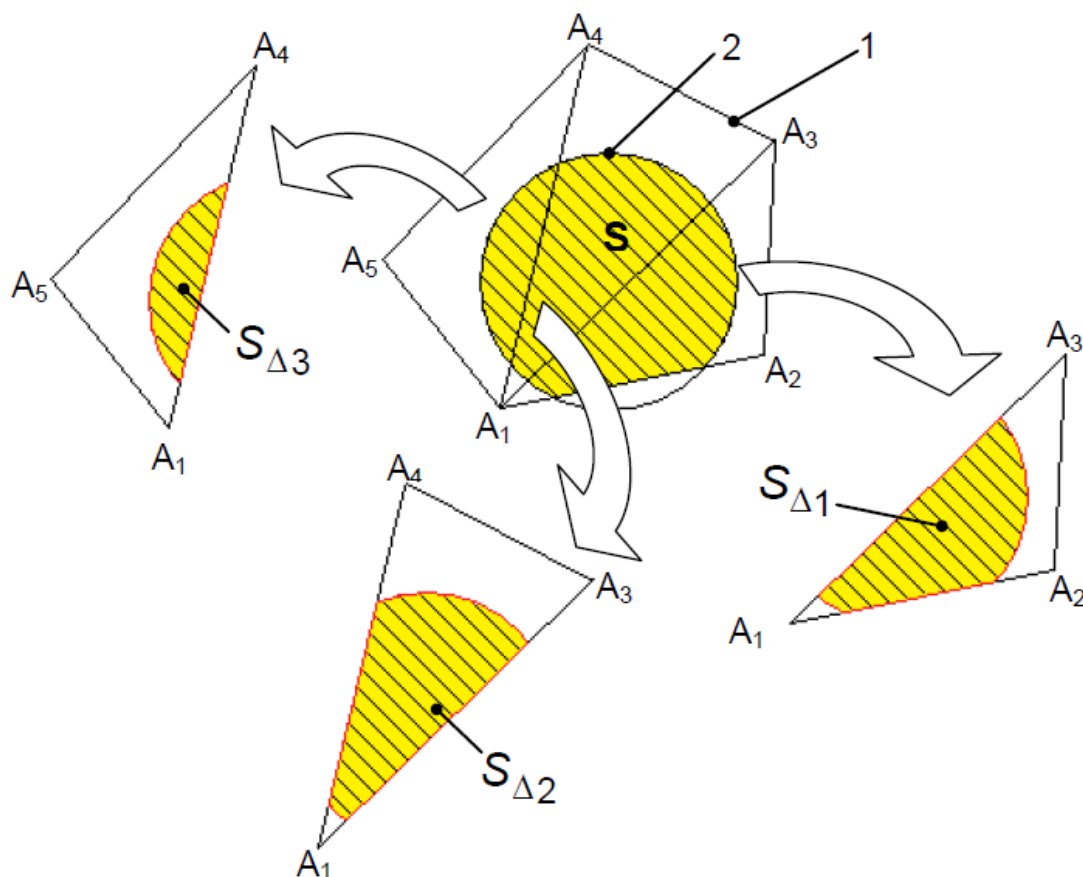


Рисунок 2 – Определение площади пересечения круга и многоугольника:

- 1 – многоугольник, описывающий селитебную территорию НП;
- 2 – зона поражения аварийной РН

Таким образом, площадь пересечения круга и многоугольника находится как

$$S = \sum_{i=1}^{N_{\Delta}} S_{\Delta i}, \quad (6)$$

где $S_{\Delta i}$ – площадь пересечения круга и i -го треугольника, составляющего многоугольник НП.

Такой подход позволяет свести задачу поиска площади пересечения круга и многоугольника к более простой задаче пересечения круга и треугольника, которая может быть относительно легко формализована. Получение площади пересечения круга и треугольника в зависимости от их взаимного расположения может быть сведено к нескольким основным случаям в зависимости от количества вершин треугольника, которые находятся внутри круга.

Для построения стандартной процедуры определения площади пересечения круга и треугольника предварительно вершины треугольника необходимо соответствующим образом перенумеровать. Ограничимся случаем, когда левая точка треугольника имеет номер 1, правая – номер 3). Основные случаи пересечения круга и треугольника, а также расчетные соотношения для оценки площади их пересечения представлены в табл. 1.

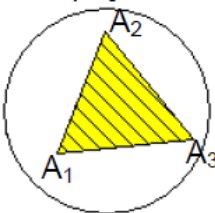
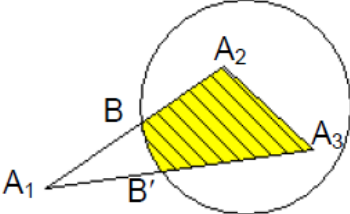
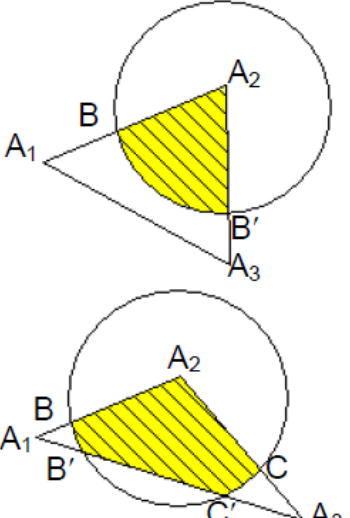
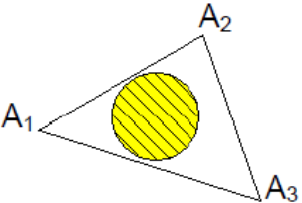
В качестве примера покажем, каким образом определяется площадь пересечения круга и треугольника в случае, когда две его вершины находятся внутри круга (пункт 2 табл. 1). В этом случае фигурой пересечения будет криволинейная трапеция BA_2A_3B' . Ее площадь определится как

$$S = S_{\Delta A_1 A_2 A_3} - S_{\Delta A_1 B B'} + S_{Seg B B'},$$

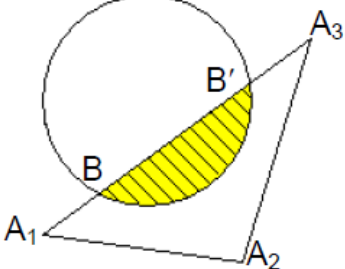
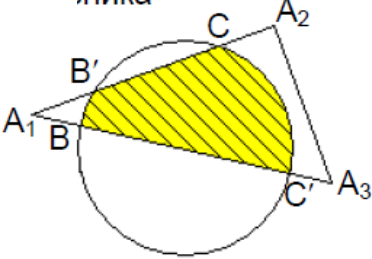
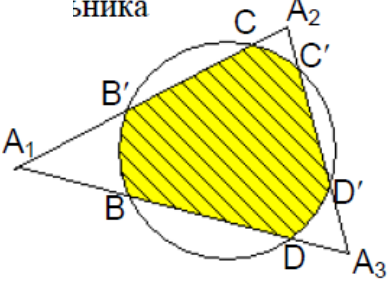
где $S_{\Delta A_1 A_2 A_3}$ – площадь треугольника $A_1 A_2 A_3$; $S_{\Delta A_1 B B'}$ – площадь треугольника $A_1 B B'$; $S_{Seg B B'}$ – площадь сегмента, отсекаемого хордой BB' .

Таким образом, для определения $N_{пор}$ согласно (4) или (5) для рассматриваемого момента времени возникновения аварии РН (t_j) моделируются точки падения аварийной РН и для каждой из них определяется площадь пересечения зоны поражения РН и площади селитебной территории НП в соответствии с предложенной процедурой. По результатам моделирования определяется среднее количество пораженных в НП $\bar{N}_{пор}(t_j)$, соответствующее рассматриваемому моменту времени возникновения аварийного отказа РН.

Таблица 1 – Типовые случаи пересечения треугольника и круга

Случай пересечения круга и треугольника	Площадь фигуры пересечения
1. Все вершины треугольника в круге 	$S = S_{\Delta A_1 A_2 A_3}$
2. Внутри круга две вершины треугольника 	$S = S_{\Delta A_1 A_2 A_3} - S_{\Delta A_1 B B'} + S_{Seg B B'}$
3. Внутри круга одна вершина треугольника 	$S = S_{\Delta B A_2 B'} + S_{Seg B B'}$ $S = S_{\Delta A_1 A_2 A_3} - S_{\Delta A_1 B B'} - S_{\Delta A_3 C C'} + S_{Seg B B'} + S_{Seg C C'}$
4. Вершины треугольника внутри круга отсутствуют 4.1 круг внутри треугольника 	$S = S_{кр}$

Продолжение таблицы 1

Случай пересечения круга и треугольника	Площадь фигуры пересечения
4.2 круг пересекает одну сторону треугольника 	$S = S_{SegBB'}$
4.3 круг пересекает две стороны треугольника 	$S = S_{BB'CC'} + S_{SegBB'} + S_{SegCC'}$
4.4 круг пересекает три стороны треугольника 	$S = S_{\Delta A_1 A_2 A_3} - S_{\Delta A_1 B B'} - S_{\Delta A_2 C C'} - S_{\Delta A_3 D D'} + S_{SegBB'} + S_{SegCC'} + S_{SegDD'}$

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: $S_{\Delta A_1 A_2 A_3}$ – площадь треугольника $A_1 A_2 A_3$; $S_{SegBB'}$ – площадь сегмента, отсекаемого хордой BB' ; $S_{BB'CC'}$ – площадь четырехугольника $BB'CC'$; $S_{кр}$ – площадь круга.

Для оценки коллективного риска при падении аварийной РН непосредственно воспользуемся общим соотношением (3), в котором для определения интеграла будем использовать метод трапеций (см. рис. 3):

$$E_c = Q \sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} P_{\Delta t_j} \cdot \frac{\Delta t_j}{t_k} \left[\frac{\bar{N}_{пор}(t_j) + \bar{N}_{пор}(t_{j-1})}{2} \right], \quad (7)$$

где $\bar{N}_{пор}(t_j)$ – среднее количество погибших в НП в случае аварии РН в момент времени t_j .

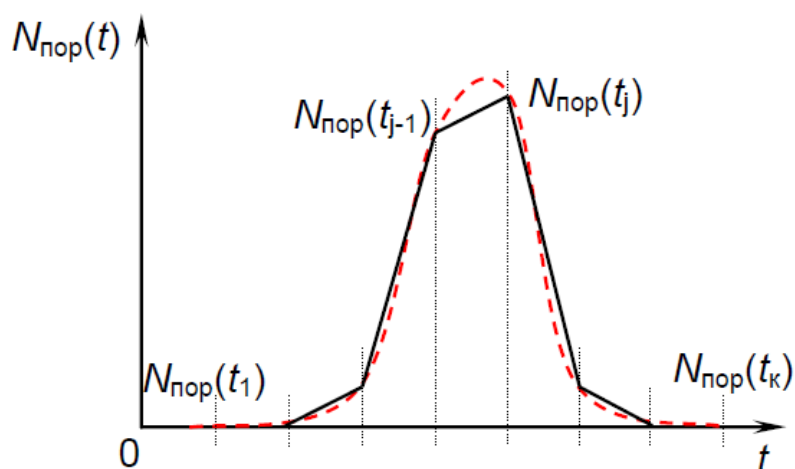


Рисунок 3 – Среднее количество пораженных в НП в зависимости от времени аварии РН

Соответствующая блок-схема общей процедуры оценки коллективного риска для НП, который попадает в зону падения аварийной РН, показана на рис. 4.

В качестве примера покажем использование предложенной процедуры оценки коллективного риска для НП (см. рис. 1), который попадает в аварийную зону трассы пуска РН типа «Днепр». Координаты вершин многоугольника, который описывает селитебную территорию НП, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Координаты вершин многоугольника, описывающего селитебную территорию НП, в стартовой системе координат

Вершина	X, км	Z, км
A ₁	19,195	3,190
A ₂	18,880	3,465
A ₃	18,368	2,948
A ₄	18,823	2,611
A ₅	19,108	2,885

В рассматриваемом населенном пункте проживает 200 жителей. Площадь рассматриваемого НП в соответствии с (3) равна $S_{НП} = 0,38$ км², и соответственно плотность населения $\lambda = 529,3$ чел/км².

Время работы первой ступени РН составляет 97 с, при этом в случае возникновения аварии до 64 с аварийная РН будет достигать поверхности земли без разрушения.

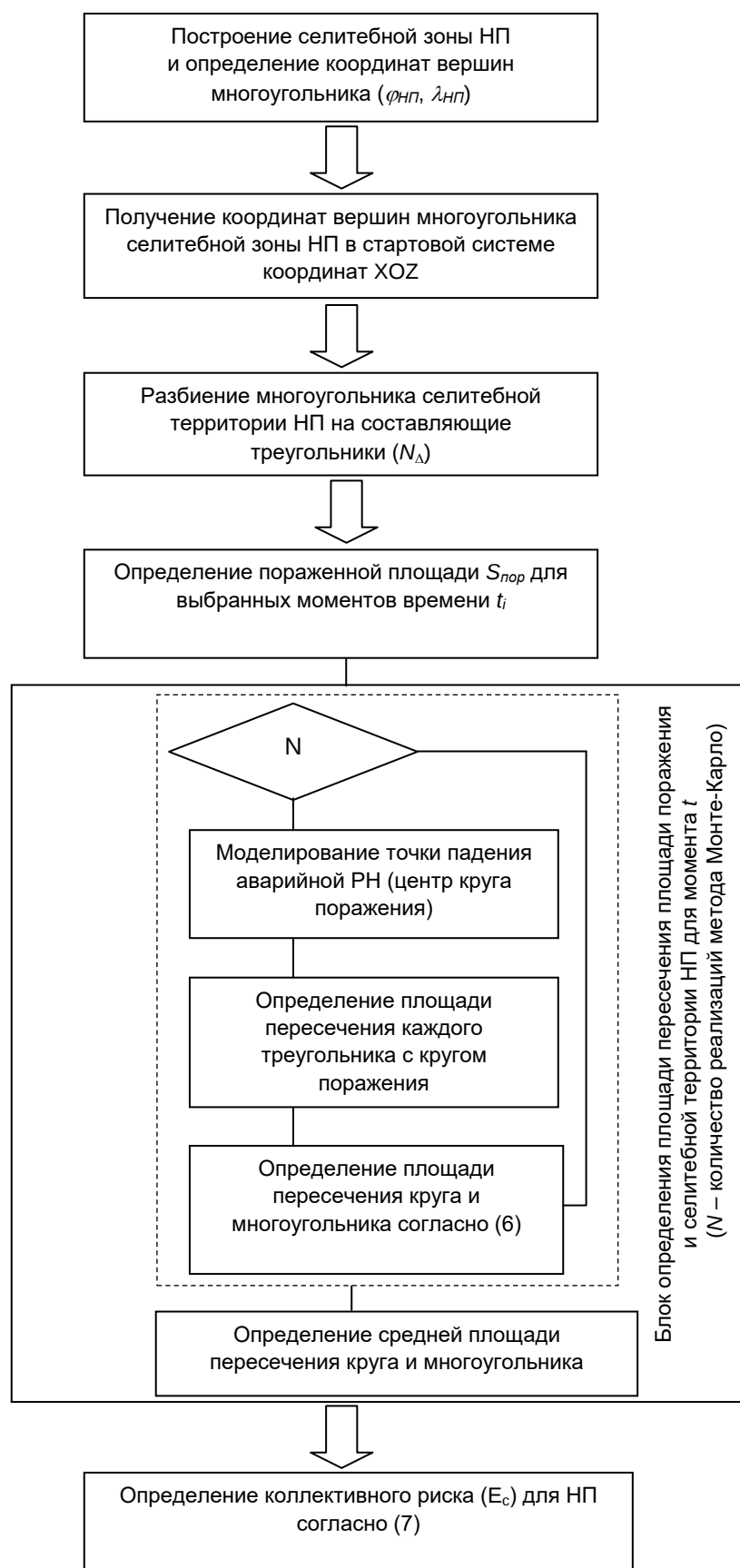


Рисунок 4 – Блок схема определения коллективного риска

Надежность РН на этапе полета первой ступени составляет 0,992. Для расчетов принималась следующая модель возникновения аварийных отказов по времени работы ступени: на первых 5 % времени полета происходит в среднем 25 % отказов ступени, на последних 15 % времени – примерно 15 % отказов, остальные 60 % отказов ступени приходятся на промежуточный интервал между 5 % и 85 % времени работы ступени. При этом распределение аварийных отказов на указанных интервалах времени принимается равномерным.

Характеристики рассеивания точек падения аварийной РН в зависимости от времени аварии РН (рассматривались интервалы времени 10 с) приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Характеристики рассеивания точек падения аварийной РН

$t, \text{с}$	$m_X, \text{км}$	$\sigma_X, \text{км}$	$\sigma_Z, \text{км}$
0	0,0	0,1	0,1
10	0,3	1,3	1,1
20	4,2	3,4	2,6
30	10,6	5,8	4,3
40	21,2	8,1	5,9
50	45,8	10,5	7,5
60	112,5	12,1	8,8

В качестве поражающего фактора при падении аварийной РН рассматривается только ударная волна. Радиусы поражения для людей от взрывной ударной волны при падении аварийной РН в зависимости от времени аварии РН показаны на рис. 5.

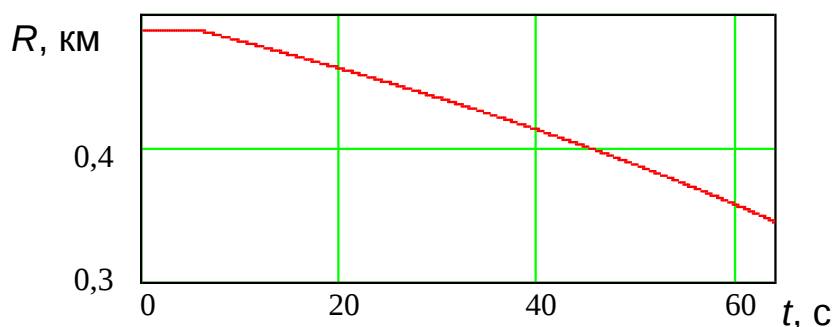


Рисунок 5 – Радиус поражения при падении аварийной РН

При расчете площади пересечения круга поражения и селитебной территории НП для каждого момента времени аварии РН использовалось $N = 10^5$ итераций метода Монте-Карло.

На рис. 6 показан график среднего количества пораженных в рассматриваемом НП в зависимости от времени аварии РН.

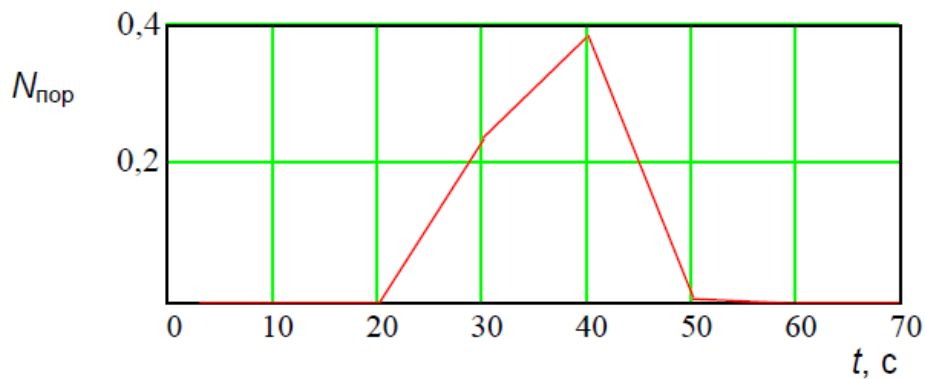


Рисунок 6 – Среднее количество пораженных в НП

В соответствии с предложенной процедурой величина коллективного риска для рассматриваемого НП составит $3,9 \cdot 10^{-5}$. Традиционный подход, для которого селитебная территория НП представляется в виде прямоугольника, стороны которого параллельны осям X и Z стартовой системы координат (как показано на рис. 7), дает значение $E_c = 3,7 \cdot 10^{-5}$.

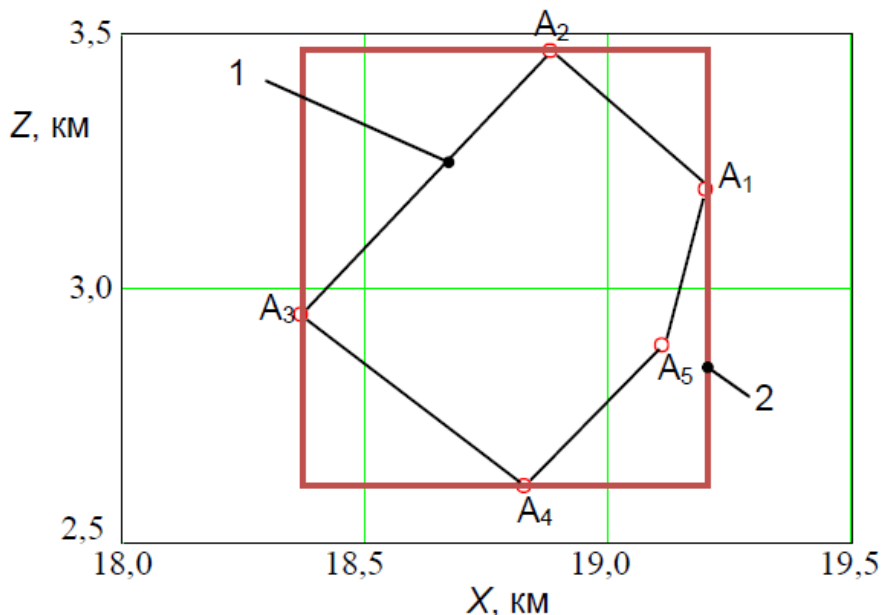


Рисунок 7 – Представление площади НП в виде типового прямоугольника.

На рисунке: 1 – зона селитебной территории НП;
2 – охватывающий прямоугольник

Заметим, что как в одном, так и в другом случае имеет место превышение уровня коллективного риска и, соответственно, необходимо применение дополнительных мероприятий для обеспечения безопасности людей в НП при пуске РН.

Выводы

Таким образом, в статье предложен универсальный способ оценки коллективного риска для НП в случае аварии РН на этапе полета, который основан на представлении селитебной территории НП в виде многоугольника и определении её площади пересечения с зоной поражения аварийной РН. Для вычисления коллективного риска предложено использовать процедуру, основанную на статистическом моделировании.

В заключение необходимо отметить, что предложенная в статье процедура представляется универсальной и может быть использована и для случая фрагментации аварийной РН на участке пассивного падения. В этом случае указанную процедуру необходимо применить для каждого фрагмента, образующегося при падении аварийной РН.

Список использованных источников

1. ДСТУ ISO 14620-1: 2008 Космічні системи. Вимоги безпеки. Частина 1. Безпечність системи (ISO 14620-1: 2002, IDT).
2. Federal Register. Part II 14 CFR Parts 413, 415 and 417 Licensing and Safety Requirements for Launch.
3. AFSPCMAN 91-710 Air Force Space Command Manual. Range safety user requirements manual.
4. 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. – Днепропетровск: ГПКБЮ, 2015. – Вып. 3. – С. 50 – 56.
5. Гладкий Э.Г., Перлик В.И. Математические модели оценки риска для наземных объектов при пусках ракет-носителей // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. тр. – Днепропетровск: ГПКБЮ, 2010. Вып. 2. – С. 3-19.

Поступила в редакцию 24.01.2018.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*