

К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПАДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ПЛОЩАДКУ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Андрей Иванович Касьян, к.т.н., доцент, МФПУ "Синергия"
Александр Николаевич Медведь, к.т.н., с.н.с., Московский университет МВД
Игорь Александрович Нестеров, к.т.н., доцент, МФПУ "Синергия"
Виталий Павлович Тандура, заслуженный штурман Российской Федерации

Статья посвящена рассмотрению возможных способов расчета вероятности падения тяжелых летательных аппаратов на площадку атомной электростанции (АЭС). Приведены алгоритм и пример результатов расчета указанной вероятности. Сформулированы нерешенные проблемы при осуществлении расчетов вероятности падения летательных аппаратов на эту площадку.

Article is devoted to the calculation of the probability of falling heavy aircrafts on nuclear power plant (NPP) site. Algorithm and an example of the results of the calculation of this probability are given. Unsolved problems in the implementation of calculations of the probability aircraft crashes to that site are stated.

Ключевые слова: атомная электростанция, вероятность падения летательного аппарата на объект, расчетные алгоритмы.

Keywords: nuclear power plant, the probability of aircraft falling on object, algorithms for calculations.

Над проблемой защиты АЭС от падения самолетов впервые задумались в шестидесятых годах минувшего века, когда началась разработка первых стандартов безопасности для таких объектов. Очевидно, что высокоскоростной удар тяжелого летательного аппарата (ЛА), содержащего к тому же большое количество топлива, относится к числу наиболее неблагоприятных воздействий, и его обязательный учет был предусмотрен российскими и зарубежными нормами проектирования АЭС, а также рекомендациями МАГАТЭ [1, 2].

Согласно российским нормам [3], в проекте АЭС обязательно должны быть приняты меры, исключающие аварию реактора вследствие столкновения со зданием энергоблока легкого самолета, совершающего полеты в внутренних авиалиниях. Аналогичное требование содержится в нормах некоторых других стран. Мероприятия, локализуя последствия указанного инцидента, как правило, позволяют одновременно обеспечить защиту от летящих тел другой природы с близкими массами и скоростями (например, поднятых в воздух ураганом или торнадо; образовавшихся при обрушении вышерасположенных строительных конструкций и т.п.).

Падение на территорию АЭС и ее энергоблоки тяжелых самолетов, как правило, относится к числу запроектных аварий и требует принятия необходимых организационных мер для того, чтобы вероятность такого события не превышала определенного порогового значения (порядка $10^{-6} \dots 10^{-7}$ год⁻¹). Следует отметить, что анализ опасности такого воздействия до недавнего времени основывался на предположении, что падение самолета является аварийным, т.е. непреднамеренным. Однако после террористической атаки на небоскребы Всемирного торгового центра в Нью-Йорке с применением тяжелых пассажирских самолетов, совершенной 11 сентября 2001 г., стало невозможно пренебрегать возможностью преднамеренного удара самолета в здание АЭС. В связи с этим при разработке проектов новых АЭС заказчики стали выдвигать требования к обеспечению стойкости этих объектов по отношению к воздействию, связанному с падением сверхтяжелых летательных аппаратов массой 400 т (Boeing 747-8, Ан-124) при скорости соударения порядка 150 и даже 200 м/с.

В настоящей статье рассматриваются вопросы безопасности АЭС, не связанные с преднамеренными атаками. Так, американский стандарт безопасности [4] для оценки вероятности падения воздушного судна (ВС) на территорию АЭС и ее энергоблоки предлагает использовать так называемую "четырёхэлементную" формулу:

$$F = \sum_{ijk} N_{ijk} \cdot P_{ijk} \cdot f_{ijk}(x, y) \cdot A_{ij},$$

где F - расчетная частота падения воздушных судов на территорию АЭС (или на энергоблоки), число событий/год;

N_{ijk} - число полетов воздушных судов j -той группы на i -том этапе полета по k -му участку маршрута (воздушной трассы);

P_{ijk} - частота аварийных ситуаций для воздушного судна j -той группы на i -том этапе полета по k -му участку маршрута;

$f_{ijk}(x, y)$ - условная плотность вероятности падения воздушного судна j -той группы на i -том этапе полета по k -му участку маршрута в результате возникновения аварийной ситуации на участок площадью в 1 кв. миль, центр которого характеризуется координатами (x, y) ;

A_{ij} - эффективная площадь АЭС (энергоблока АЭС) для воздушных судов j -той группы на i -том этапе полета, кв. миль.

$i = 1, 2, 3$ (номер этапа полета: 1 - взлет, 2 - полет по маршруту, 3 - посадка);

$j = 1, 2, \dots, 11$ (номер, соответствующий группе самолетов определенного класса);

$k = 1, 2, \dots, K$ - условный номер участка маршрута (воздушной трассы).

Данная формула представляется чрезмерно "теоретической", поскольку она предполагает наличие исходных данных, которые на практике получить далеко не всегда возможно. К примеру, затруднен сбор информации о матрице вероятностей P_{ijk} с учетом того, что число участков воздушных трасс в районе АЭС может составить несколько десятков, поэтому с учетом 11 групп самолетов, предусмотренных стандартом, число значений P_{ijk} может измеряться несколькими сотнями. Еще более эфемерной представляется получение достоверных оценок условной плотности вероятности падения воздушного судна в определенном географическом районе (американские специалисты проделали большую работу и статистически оценили соответствующие плотности вероятности для континентальной части США (CONUS), однако при этом данные разных исследователей порой отличаются на два порядка). Далее, в стандарте [4] определены лишь самые общие принципы определения эффективной площади "мишени" A_{ij} . Так, способы учета экранирования зданий АЭС рельефом местности, специальными техническими сооружениями, явления рикошетирования воздушного судна, соприкоснувшегося с земной поверхностью при небольших углах наклона траектории, не формализованы.

Большим достоинством американской методики, по-видимому, можно считать продуманный алгоритм учета вероятности аварийного воздействия на АЭС со стороны взлетающих (приземляющихся) летательных аппаратов. Этот алгоритм предусматривает использование заранее рассчитанных полей вероятности падения ЛА с учетом типа аппаратов, положения посадочного круга относительно оси ВВП, рекомендованной скорости набора высоты (снижения) в районе аэродрома и т.п. (таблица 1).

Таблица 1 - Вероятности падения малоразмерного военного самолета на определенный участок относительно оси ВПП с отворотом вправо после выполнения взлета

0-10	1,0	0,1	1,2	2,3	3,4	4,5	5,6	6,7	7,8	8,9	9,10	10,11	11,12	12,13
0,0								1,00E-6	2,40E-6	2,80E-6	1,70E-6			
0,1	1,0E-4	1,0E-4	1,0E-4	8,0E-5	4,0E-5	3,7E-5	2,3E-4	8,0E-4	1,7E-3	2,0E-3	1,4E-3	8,0E-4	1,3E-4	1,0E-5
0,2	1,0E-3	1,0E-3	1,0E-3	1,0E-3	1,0E-3	1,0E-3	1,0E-3							
0,3	1,0E-2	1,0E-2	1,0E-2	1,0E-2	1,0E-2	1,0E-2	1,0E-2							
0,4	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-1							
0,5	1,0E+0	1,0E+0	1,0E+0	1,0E+0	1,0E+0	1,0E+0	1,0E+0							
0,6	1,0E+1	1,0E+1	1,0E+1	1,0E+1	1,0E+1	1,0E+1	1,0E+1							
0,7	1,0E+2	1,0E+2	1,0E+2	1,0E+2	1,0E+2	1,0E+2	1,0E+2							
0,8	1,0E+3	1,0E+3	1,0E+3	1,0E+3	1,0E+3	1,0E+3	1,0E+3							
0,9	1,0E+4	1,0E+4	1,0E+4	1,0E+4	1,0E+4	1,0E+4	1,0E+4							
1,0	1,0E+5	1,0E+5	1,0E+5	1,0E+5	1,0E+5	1,0E+5	1,0E+5							

С другой стороны, в американском стандарте отсутствуют разделы, нормирующие правила учета опасности, создаваемой для АЭС пилотажными зонами военной авиации, а также зонами пусков ракет, стрельб и бомбометаний.

В Российской Федерации в связи с тем, что авиация общего назначения пока не получила сопоставимого по масштабам с США развития (у нас нет десятков тысяч самолетов и вертолетов в личном пользовании и столь же огромного числа частных малых аэродромов), представляется нерациональным воспроизведение "американской" методики учета опасности воздушного движения для АЭС что называется "в лоб". Здесь главная угроза исходит от летательных аппаратов, следующих по воздушным трассам, и в меньшей степени - от активности на местных воздушных линиях, для каждой из которых характерны положение оси трассы (линии), ее ширина, диапазон высот полета ЛА и частота движения в прямом и обратном направлении.

Далее описан подход, реализованный авторами при выполнении расчетов вероятности аварийного воздействия на АЭС летательных аппаратов, осуществляющих полеты по воздушным трассам.

Математическая модель для оценки вероятности падения ЛА на площадку АЭС и ее энергоблоки на этапе полета по воздушным трассам

Принято считать, что непреднамеренное падение ЛА на площадку АЭС может быть обусловлено [5]:

- техническими отказами оборудования летательного аппарата или средств управления воздушным движением;
- ошибками экипажа и группы руководства полетами ("человеческий фактор");
- неблагоприятными метеорологическими условиями.

Надзорные органы государств и ИКАО ведут учет аварий и катастроф и располагают достоверной и предоставительной статистикой потерь ЛА. Эмпирические частоты катастроф зависят от класса ЛА и этапа его полета. Установлено, что аварийные происшествия чаще всего происходят на этапах взлета и посадки (85...90 % аварий и катастроф). Между тем, продолжительность полета по маршруту, как правило, в несколько раз превышает время, затрачиваемое на взлетно-посадочные операции, набор высоты и снижение.

Летательный аппарат всегда отклоняется в пространстве от расчетной траектории полета. Отклонения по своей природе обусловлены ошибками самолетоуправления (ошибки навигационных систем, ошибки экипажей, метеорологические факторы и т.п.). Чем выше качество навигации, тем меньше вероятность падения ЛА на отдельный энергоблок или площадку АЭС, поскольку трассы воздушных линий, зоны пилотирования и т.п., как правило, не проводят непосредственно над опасными объектами.

К числу факторов, которые следует принимать во внимание при расчете вероятности падения ЛА на площадку АЭС, можно отнести:

- номинальные значения высоты полета (эшелон) - H , плановую путевую скорость полета - W , а также минимальное боковое (плановое) отклонение траектории полета (воздушного коридора) от центра площадки АЭС (A_0) и ее энергоблоков (A_i);
- характеристики, отражающие точность навигационных систем

ЛА и параметры пилотирования (среднеквадратичное отклонение (СКО) ошибки выдерживания высоты полета σ_y , СКО боковой ошибки σ_z , ширину воздушного коридора L_{KZ});

- размах крыла ЛА, полетную массу и радиус фюзеляжа;
- размеры и конфигурацию площадки АЭС;
- размеры, ориентацию и место расположения энергоблоков на площадке АЭС;
- число рейсов ЛА, выполняемых ежегодно по каждой из трасс, проходящих в районе площадки АЭС (на рисунке 1 в качестве примера приведена структура воздушного пространства в районе возведения Белорусской АЭС);
- число вылетов ЛА государственной авиации на полигоны (в зоны отработки техники пилотирования);
- распределение числа обломков тяжелых ЛА по массам при летном происшествии и доля случаев, когда ЛА в результате летного происшествия разрушается в воздухе.



Рисунок 1 - Структура воздушных трасс, проходящих над северной частью Белоруссии в районе строительства АЭС

На маршруте (трассе) полета плотности вероятности положения ВС вдоль осей OX (продольной), OY (вертикальной) и OZ (боковой) считаются независимыми и задаются следующим образом:

вдоль оси OX (направление трассы полета на рассматриваемом участке) - равномерное распределение с плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{P_{авар}}{W} k_M, \text{ (км}^{-1}\text{)},$$

где $P_{авар}$ - вероятность аварии (катастрофы) ЛА при полете по маршруту в течение одного летного часа;

W - средняя скорость самолета на трассе;

k_M - доля числа катастроф, возникающих на этапе полета по воздушной трассе;

вдоль оси OY (вертикальная ось в земной системе координат) - нормальное распределение с математическим ожиданием, соответствующим рекомендованной высоте трассы и СКО, которое зависит от точности выдерживания высоты (определяется точностью приборного оборудования ЛА)

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right], \text{ (км}^{-1}\text{)},$$

где m_y - рекомендованная высота полета ЛА (эшелон полета);

σ_y - среднеквадратическое отклонение высоты полета ЛА относительно рекомендованной;

вдоль оси OZ (дополняющей оси OX и OY в правой декартовой системе координат) - равномерное распределение внутри рекомендованного коридора с экспоненциальным спадом по его краям

$$f(z) = \begin{cases} \frac{k}{L_{KZ}}, & \text{при } |z| \leq L_{KZ} / 2; \\ \frac{1-k}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z-L_{KZ}/2)^2}{2\sigma_z^2}\right], & \text{при } |z| > L_{KZ} / 2, \end{cases} \text{ (км}^{-1}\text{)},$$

где L_{KZ} - ширина трассы (воздушного коридора);
 σ_z - среднеквадратическое отклонение боковой координаты ЛА

$$k = L_{KZ} / (L_{KZ} + \sqrt{2\pi}\sigma_z).$$

от рекомендованного коридора полета,

Указанные закономерности иллюстрируются рисунком 2.

Считается, что траектория падения ЛА является прямолинейной со следующими законами распределения угловых параметров:

- курсовой угол относительно заданной линии пути (направления трассы) распределен по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением σ_φ при этом курсовой угол по модулю не превосходит 90°

$$f(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} \exp\left[-\frac{\varphi^2}{2\sigma_\varphi^2}\right];$$

- угол снижения ЛА относительно горизонтальной плоскости ϵ распределен равномерно в диапазоне от 10° до 45° (угол отсчитывается вниз относительно горизонтали). Этот диапазон определен эмпирически при расследовании обстоятельств летных происшествий.

Наибольшая протяженность участка местности, на котором теоретически возможно падение ЛА при возникновении аварийной ситуации в некоторой точке воздушного пространства, приблизительно определяется номинальной высотой трассы и минимальным углом снижения ЛА при аварийном происшествии (по терминологии [5] - "дистанция отбора")

$$L_{KX} = \frac{m_y}{\operatorname{tg} 10^\circ}.$$

Указанные закономерности иллюстрируются рисунком 3.

Вероятность падения на АЭС одиночного ЛА i -го типа при полете на участке трассы длиной L_{KX} можно определить, проинтегрировав выражение

$$P_i^t = \int_0^{L_{KX}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)f(y)f(z)P_\varphi(x,y,z)P_\epsilon(x,y,z,\varphi) dx dy dz,$$

где $P_\varphi(x, y, z)$ - вероятность того, что траектория падающего ЛА из точки пространства с координатами (x, y, z) соответствует диапазону курсовых углов, обеспечивающих "прохождение" ЛА через площадку АЭС в горизонтальной плоскости;

$P_\epsilon(x, y, z, \varphi)$ - вероятность того, что траектория падающего ЛА из точки пространства с координатами (x, y, z) и курсовым углом φ соответствует диапазону углов снижения, обеспечивающих "прохождение" ЛА через площадку АЭС в вертикальной плоскости.

Вероятности $P_\varphi(x, y, z)$ и $P_\epsilon(x, y, z, \varphi)$ определяются следующим образом:

$$P_\varphi(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \exp\left[-\frac{\varphi^2}{2\sigma_\varphi^2}\right] d\varphi;$$

$$P_\epsilon(x, y, z, \varphi) = \frac{1}{(\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min})(\varphi_{\max} - \varphi_{\min})} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \epsilon_\varphi(\varphi) d\varphi,$$

где φ - угол визирования объекта в горизонтальной плоскости;

$\epsilon_\varphi(\varphi)$ - величина угла, под которым "виден" объект (площадка АЭС) в вертикальной плоскости, при текущем значении угла φ ;

φ_{\min} и φ_{\max} - минимальный и максимальный углы визирования площадки АЭС в горизонтальной плоскости;

ϵ_{\min} и ϵ_{\max} - минимальный и максимальный углы визирования площадки АЭС в вертикальной плоскости.

Если объект попадает в установленный допустимый диапазон углов лишь частично, под φ_0 и ϵ_0 понимают ту часть угла, которая входит в допустимый диапазон. Если φ_0 или ϵ_0 не принадлежат допустимым диапазонам углов, то соответствующую вероятность полагают равной 0.

Положение и размеры энергоблока АЭС (аппроксимированного прямоугольным параллелепипедом) относительно начала системы координат определяются следующими параметрами (рисунком 4):

- координатами центра объекта x_0, z_0 в декартовой системе координат, связанной с трассой полетов;
- длиной, шириной и высотой объекта l_x, l_z, l_y ;
- углом ориентации главной оси объекта ψ относительно оси ОХ декартовой системы координат, связанной с трассой полетов.

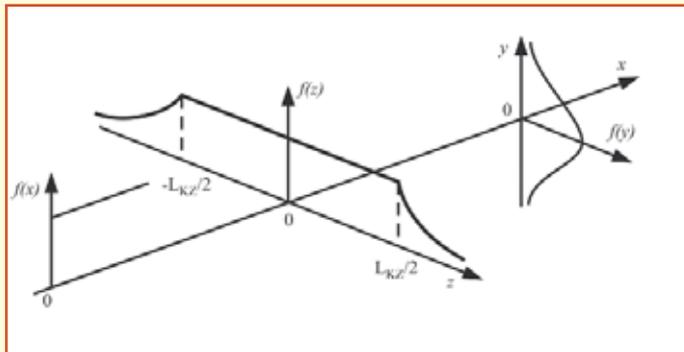


Рисунок 2 - Плотности распределения координат ЛА на трассе

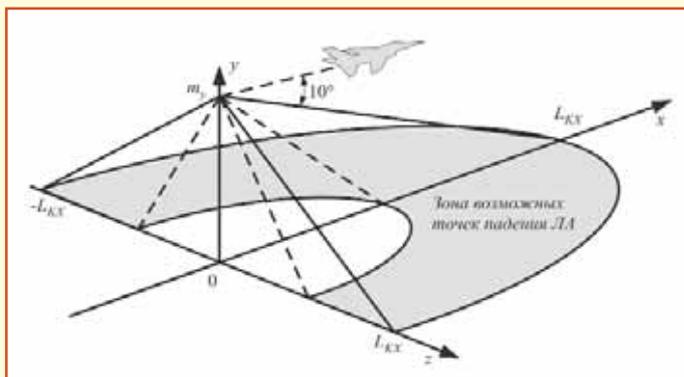


Рисунок 3 - Форма и размеры зоны возможных точек падения ЛА относительно точки, в которой возникает аварийная ситуация

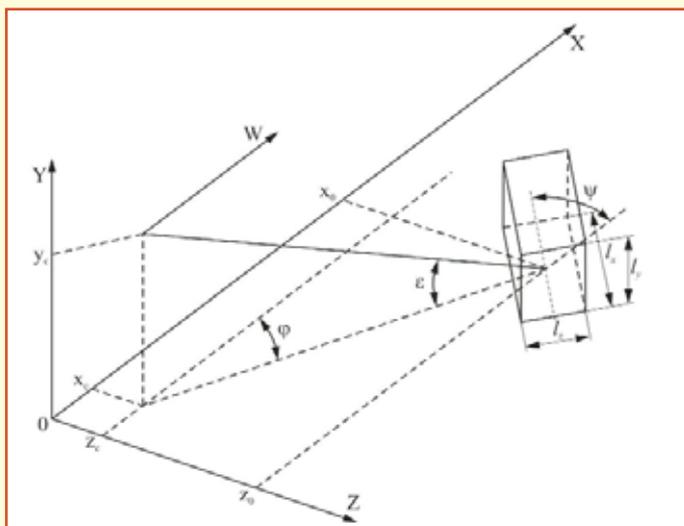


Рисунок 4 - Взаимное расположение ЛА и здания энергоблока в начальный момент перехода ЛА на траекторию падения

Практически важными для проведения расчетов вероятности падения ЛА случаями можно считать:

- наличие участка траектории, на котором высота линейно изменяется (участки набора и потери высоты);
- наличие участка траектории, на котором ЛА осуществляет поворот на некоторый курсовой угол.

В первом случае следует учитывать тот факт, что ширина воздушного коридора, для которого должна рассчитываться ненулевая вероятность падения ЛА, сокращается с уменьшением высоты полета (рисунком 5).

Во втором случае траекторию ЛА (и воздушный коридор) разбивают на три участка: два прямолинейных и участок выполнения разворота (между точками А и В на рисунке 6).

Учет числа полетов ЛА по указанной трассе в течение заданного временного промежутка (обычно один год) может быть выполнен с помощью формулы повторения событий, в соответствии с которой вероятность падения хотя бы одного летательного аппарата

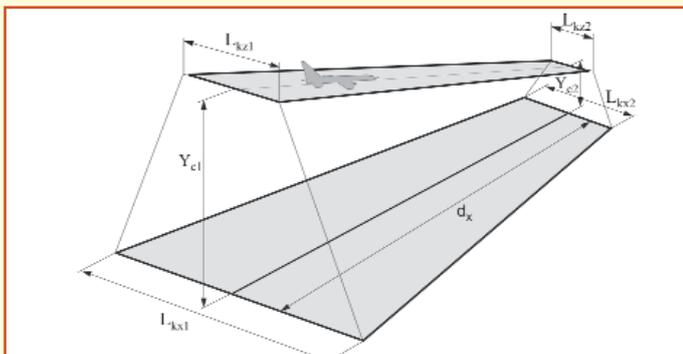


Рисунок 5 - К расчету вероятности падения ЛА на объект при переменной высоте полета

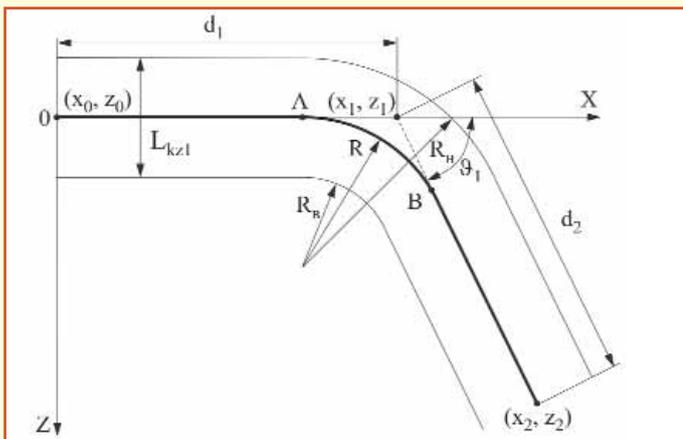


Рисунок 6 - К расчету параметров зоны возможных точек падения при изменении курсового угла ЛА

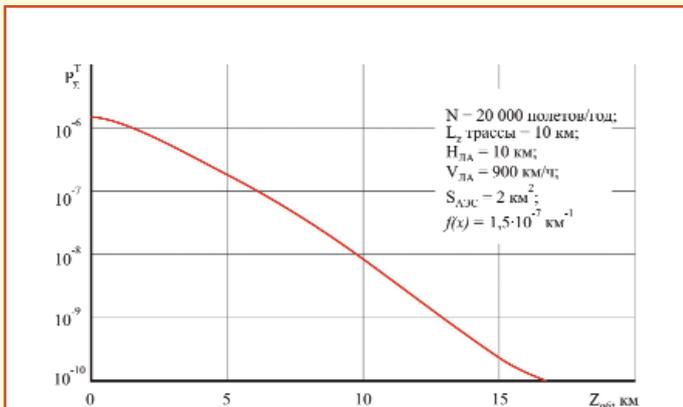


Рисунок 7 - Зависимость вероятности падения ЛА на площадку АЭС от удаления центра площадки от оси воздушной трассы

на объект при полетах по i -той трассе составляет где N_i - число полетов ЛА по i -й трассе на протяжении года. При наличии L трасс в районе объекта суммарную годовую веро-

$$P_{\Sigma}^i = 1 - (1 - P_1^i)^{N_i},$$

ятность падения ЛА на объект при полете по трассам можно определить по формуле:

$$P_{\Sigma}^T = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P_{\Sigma}^i).$$

Далее аналогичным образом определяется "однократная" вероятность падения ЛА на объект при выполнении полета на j -м полигоне (зоне отработки техники пилотирования) из числа имеющих в районе объекта, а затем - вероятность падения множества ЛА на объект при полетах на j -м полигоне на протяжении года и, наконец, вычисляется средняя годовая вероятность падения ЛА на объект из всех зон полигонов.

На следующем этапе устанавливается вероятность падения на объект обломков ЛА, для чего определяется типовой угол падения обломков с определенной высоты при известной начальной скорости ЛА на траектории полета (начальная точка разлета обломков определяется описанным выше способом в процессе имитационного моделирования). С учетом среднего числа возникающих обломков ЛА и доли летных происшествий, сопровождающихся разрушением ЛА в воздухе, определяется средняя годовая вероятность падения обломков ЛА на объект при полетах по всем трассам.

Затем определяется окончательная вероятность падения ЛА или обломков ЛА на площадку АЭС в течение года по выше приведенной формуле.

На рисунке 7 представлены результаты расчета вероятности падения ЛА на площадку АЭС в зависимости от удаления центра площадки

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_{\Sigma}^T)(1 - P_{\Sigma}^H)(1 - P_{\Sigma}^{O6}).$$

до оси воздушной трассы, выполненные для следующих условий:

- ширина трассы - 10 км;
- число полетов в год - 20 000;
- средняя высота полета - 10 км,
- средняя скорость ЛА - 900 км/ч;
- размеры площадки АЭС - 1х2 км;
- плотность вероятности аварии с ЛА на трассе - $1,5 \cdot 10^{-7}$ км⁻¹.

Отметим некоторые "трудные места" при реализации предложенной методики.

Во-первых, в материалах ICAO имеются статистические данные по количеству авиационных происшествий гражданской авиации по годам (с выделением числа происшествий, относящихся к катастрофам). Также в этих материалах можно найти статистику количества полетов и авиационных происшествий по установленным регионам мира по годам и о числе происшествий с ЛА, приходящихся на 1 миллион вылетов. Но этой информации недостаточно, чтобы надежно определить значение плотности вероятности события $f(x)$ (выраженной в км⁻¹), поскольку неизвестна средняя протяженность маршрута ЛА.

Во-вторых, в материалах Межгосударственного авиационного комитета РФ публикуются данные по годам о количестве авиационных происшествий в гражданской авиации стран СНГ и из них катастроф на 100 тыс. часов налета ЛА массой более 10 т при регулярных и нерегулярных пассажирских перевозках. Чтобы на основании этих данных получить значение плотности вероятности $f(x)$ события, связанного с авиационным происшествием, приходится принимать некоторые средние условия для расчета указанных величин.

В-третьих, ввиду отсутствия надежной статистики приходится прибегать к определенному "волюнтаризму" при задании возможных минимальных и максимальных углов падения ЛА в вертикальной и горизонтальной плоскости, а также к выбору соответствующих законов распределения (в частности, при проведении расчетов считалось, что угол наклона траектории падающего ЛА распределен равномерно в диапазоне от -10° до -45° [1], а угол отклонения падающего ЛА по курсу от оси маршрута - в диапазоне от -90° до $+90^\circ$ в предположении о равномерном или нормальном законе распределения этого угла).

Для устранения указанных "трудных мест" необходимо принятие соответствующих норм или рекомендаций регулирующим органом. **П**

Литература

1. Учет внешних событий, вызванных деятельностью человека, при проектировании атомных электростанций. Руководство по безопасности № 50-SG-D5 (Rev. 1) / МАГАТЭ. Вена, 1997.
2. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No.NS-G-3.1 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002.
3. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии: НП-064-05 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2006.
4. DOE-STD-3014-2006/ Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities. U.S. Department of Energy. Washington, DC 20585.
5. Бирбраер А.Н., Ролендер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. С-Пб., 2009.

Связь с авторами: bearam08@mail.ru