

Научная статья
УДК 629.7.08

Методика оценивания уязвимости стартового комплекса на этапах его функционирования

Владимир Владимирович Козлов, Андрей Валерьевич Лагун,
Артем Дмитриевич Сыров

Аннотация. В работе раскрывается понятие уязвимости стартового комплекса на различных этапах его эксплуатации. Описана разработанная методика оценивания, которая позволяет оценить уязвимость стартового комплекса в процессе выполнения технологического процесса подготовки и пуска ракеты космического назначения на основе вероятностного метода расчета выхода параметров стартового комплекса за допустимые области функционирования при внешнем деструктивном воздействии.

Ключевые слова: уязвимость; стартовый комплекс; технологический процесс

Для цитирования: Козлов В.В., Лагун А.В., Сыров А.Д. Методика оценивания уязвимости стартового комплекса на этапах его функционирования // Вооружение и экономика. 2026. №1(75). С. 38-47.

Original article

A Methodology of the Launch Complex Vulnerability Assessment at Various Operational Stages

Vladimir V. Kozlov, Andrei V. Lagun, Artem D. Syrov

Abstract. This paper explores the concept of launch complex vulnerability at various operational stages. It describes a developed assessment methodology that allows to assess the vulnerability of a launch complex during the technological process of space missile preparation and launching, based on a probabilistic method of launch parameters deviation calculation from acceptable operating ranges under external destructive impact.

Keywords: vulnerability; launch complex; technological process

For citation: Kozlov V.V., Lagun A.V., Syrov A.D. A Methodology of the Launch Complex Vulnerability Assessment at Various Operational Stages. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 75(1): 38-47. (In Russ.).

Введение

Ракетно-космический комплекс (РКК) является одним из важнейших элементов космического комплекса в рамках космической деятельности. Без него невозможно выведение, поддержание и своевременное наращивание орбитальной группировки космических аппаратов¹. РКК занимает обширную по площади территорию и имеет сложную структуру взаимодействия между составными его элементами, выход из строя хотя бы одного из них в результате какого-либо воздействия, в частности, от внешнего деструктивного воздействия, может привести к срыву выполнения задачи по подготовке и запуске КА. Наиболее разветвленной, сложной, дорогостоящей и определяющей большинство характеристик подсистемой РКК, является технологическое оборудование стартового комплекса. В процессе подготовки ракеты космического назначения (РКН) на стартовом комплексе участвует целый ряд оборудования, ограниченный согласно ГОСТ Р 51282-99² определенным перечнем из четырнадцати агрегатов и систем, а также больше чем двадцати зданий и сооружений.

На стартовом комплексе во время работы с РКН, выполняются мероприятия технологического процесса подготовки и пуска РКН. Эти мероприятия представляют собой последовательность организационных и технических операций, выполняемых как с элементами РКН, так и в целом с РКН на техническом (ТК) и стартовом комплексе (СК). Правильность и безопасность выполняемых операций технологического процесса на СК с РКН обеспечивается большим спектром мероприятий, проводимых с РКН и обеспечивающих условия для выполнения этих задач.

¹ Козлов В.В., Кукушкин И.О., Лагун А.В., Марченко М.А. Наземное технологическое оборудование: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2022. 534 с.

² ГОСТ Р 51282-99 Оборудование технологическое стартовых и технических комплексов ракетно-космических комплексов Нормы проектирования и испытаний. М.: Издательство стандартов, 1999. 22 с.



Рисунок 1 – Размещение оборудования стартового комплекса

Процессы, происходящие на СК, непосредственно связаны с опасными последствиями от аварийных ситуаций и с риском как для здоровья и жизни людей, так и срывом выполнения задачи по запуску космического аппарата.

Исходя из этого необходимо рассмотреть наиболее уязвимые места стартового комплекса в процессе его функционирования, а также оценить риски и возможный ущерб в случае внешнего деструктивного воздействия во время подготовки РКН к пуску. *Уязвимость* – параметр, характеризующий возможность нанесения описываемой системе повреждений любой природы теми или иными внешними средствами или факторами.

Математическая модель уязвимости стартового комплекса

Технологический процесс подготовки и пуска РКН индивидуален для каждого конкретного варианта его выполнения. В то же время при описании операций технологического процесса подготовки РКН на СК можно выделить ряд стандартных этапов подготовки РКН к пуску (рисунок 2).

Поэтому технологический процесс подготовки к пуску РКН на СК условно можно разделить на следующие основные этапы выполнения работ с РКН, последовательно следующие один за другим:

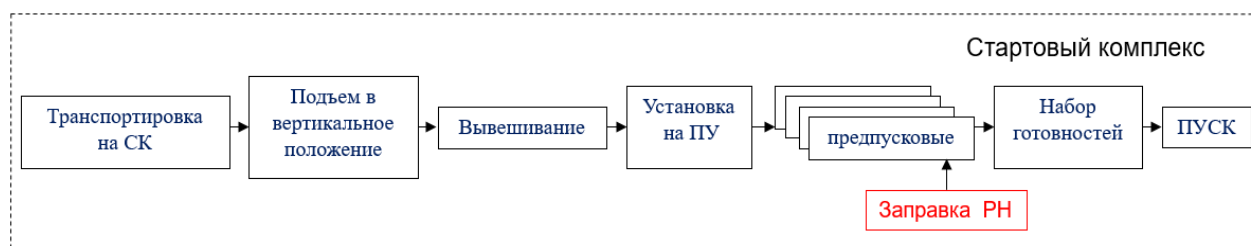


Рисунок 2 – Схема обобщенного технологического процесса подготовки РКН на СК

1. Выполнение мероприятий, связанных с транспортировкой РКН с ТК на СК. В этот момент РКН размещена на транспортно-установочном оборудовании (ТУО) в горизонтальном положении. Космический аппарат (КА) и разгонный блок (РБ), входящие в состав РКН, находятся в заправленном состоянии. Одновременно с этим на СК идет подготовка технологического оборудования к приему РКН.

2. По прибытию РКН на СК осуществляется процесс перевода ее в вертикальное положение средствами ТУО и установки на пусковое оборудование, затем следует подвод средств обслуживания и подстыковка коммуникаций, необходимых для дальнейшего обслуживания РКН.

3. После установки РКН на пусковом столе осуществляется длительный процесс обслуживания, проверки состояния ее элементов и подготовки к пуску. Данный процесс завершается заправкой РКН необходимым количеством компонентов ракетных топлив (КРТ). Для данного этапа характерно наличие на СК большого количества технологического оборудования, участвующего в подготовке РКН, и длительность протекания этапа подготовки РКН (рисунок 3).

4. Завершающими операциями, регламентирующими процесс подготовки РКН к пуску, является набор готовностей к пуску.

В процессе подготовки РКН к пуску на СК она находится на пусковом столе в вертикальном положении, постоянно взаимодействуя с находящимися рядом технологическим оборудованием СК.

Исходя из характеристики этапов подготовки РКН к пуску для каждого условного этапа можно определить следующие параметры:

- состояния СК как точка в многомерном пространстве его технических параметров;
- деструктивное воздействие как внешнего возмущающего на СК фактора;
- уязвимость как вероятность перехода СК в недопустимое состояние при внешнем деструктивном воздействии.

Пространство состояний параметров СК $\Omega \subset R^n$, где каждое состояние соответствует критическому параметру (например, целостности оборудования, давления в магистралях, наличие топлива), всего n состояний.

Пусть технологический процесс подготовки к пуску на СК состоит из m этапов, каждый этап $i \in \{0, 1, \dots, m-1\}$ характеризуется:

- вектором целевого состояния,
- допустимыми отклонениями.

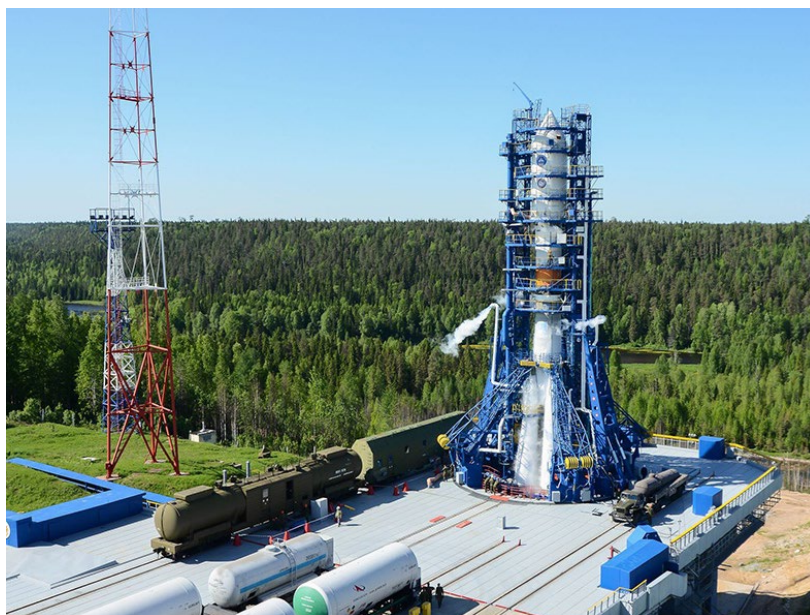


Рисунок 3 – Этап заправки РКН

Для стартового комплекса введем пространство состояний:

$$\Omega \subset R^3 \times [0, T] \times \{0, 1\}^2.$$

В выражении описаны физические координаты $(x_i, y_i, z_i) \in R$, плановое время выполнения i -го этапа $t \in [0, T]$, также учтен вектор бинарных флагов S_i , таких как наличие РКН и наличие топлива на СК.

Номинальное состояние для i -го этапа: $C_j \in \Omega$ – состояние, при котором этап успешно завершается. При этом у каждого состояния есть допустимая область $\varepsilon_i \in \Omega$ – это множество состояний, в которых система может продолжать функционировать без срыва этапа, как правило, эту область можно обозначить через окружность радиусом r_j вокруг C_j , где j – определенное состояние на i -м этапе.

Вводя понятие деструктивного воздействия как вектора $\omega \in R^m$, который характеризует интенсивность воздействия (например, мощность взрыва, место взрыва, если говорить о заправленной РКН, количество и качество деструктивного воздействия, его время воздействия), будем считать, что ω – случайный вектор с известным распределением.

Исходя из этого, уязвимость этапа можно определить как условную вероятность того, что под воздействием ω этап выйдет из допустимых областей:

$$Y = P(C_j \notin \varepsilon_j | \omega),$$

где: C_j характеризует состояние системы после воздействия на этапе.

Согласно [1] уязвимость технической системы можно определить как условную вероятность отказа системы (выхода за пределы допустимой области состояний) при условии, что произошло деструктивное воздействие:

$$Y = P[\|C_j - C_k\| > \varepsilon_0 | D],$$

где: C_k – выполнение целевой задачи (успешное завершение этапа);

C_j – фактическое состояние после деструктивного воздействия;

D – деструктивное воздействие;

ε_0 – допустимая область отклонений.

Для каждого этапа подготовки РКН на СК можно определить свое состояние, на котором будут отображаться степень повреждения и наличие последствий.

В случае множественных сценариев отказов уязвимость можно описать матрицей вероятностных переходов в различные конечные состояния при различных деструктивных воздействиях.

Для каждого этапа определим D_i – деструктивное воздействие на любом этапе. Тогда O_i – отказ на любом этапе (взрыв, разрушение ракеты или оборудования, срыв пуска).

При этом отказ может быть разной степени тяжести. Однако для упрощения в работе будет рассмотрен бинарный случай: отказ есть или нет.

Определим уязвимость как вероятность возникновения отказа при условии возникновения деструктивного события:

$$Y_i = P(O_i | D_i).$$

При этом СК переходит в состояние отказа, если хотя бы один из критериев отказа (характеризующий предельное состояние) превышает критическое значение:

$$\|C_j - C_0\| > \varepsilon_0 = \bigcup_{k=1}^4 \{g_k > g_k^{\text{крит}}\},$$

где: g_1 – механическая целостность, $g_1 = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_T}$ – отношение максимального напряжения к пределу текучести материала,
 g_2 – тепловая устойчивость, $g_2 = \frac{T_{max}}{T_{крит}}$ – отношение максимальной температуры к критической,
 g_3 – временные отклонения, $g_3 = \frac{\Delta t}{\Delta t_{max}}$ – отношение задержки к допустимому времени,
 g_4 – функциональные отклонения, $g_4 = 1 - \prod_j (1 - \delta f_j)$ – интегральный показатель функциональных нарушений.

Вероятность деструктивного воздействия на различных этапах может быть связано с длительностью этапа и интенсивностью самого деструктивного воздействия.

Пусть λ_i – интенсивность деструктивного воздействия (среднее количество воздействия в единицу времени) на любом этапе подготовки к пуску:

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{\left(-\frac{(t-t_y)^2}{2\sigma^2}\right)},$$

где: λ_0 – максимальная интенсивность деструктивного воздействия;

t_y – время максимальной уязвимости «окно уязвимости», например, этап заправки РКН компонентами ракетного топлива);

σ – параметр, определяющий ширину «окна уязвимости».

Тогда вероятность хотя бы одного воздействия на этапе длительностью T_i будет выражаться³:

$$P(D_i) = 1 - e^{(-\lambda_i T_i)}.$$

Если деструктивное воздействие все же произошло, то вероятность отказа будет зависеть от следующих факторов:

- количества деструктивного воздействия N_i ;
- вероятности успешного подавления одного деструктивного воздействия P_{Π} ;
- уязвимости элементов стартового комплекса к деструктивному воздействию.

При этом учтем, что каждый комплекс обладает некой системой защиты от внешних деструктивных факторов⁴.

Тогда вероятность того, что хотя бы одно деструктивное воздействие пройдет через систему защиты равна (вероятность преодоления систем защиты):

$$P_{\Pi p} = 1 - P_{\Pi}^{N_i}.$$

Следует также учесть, что при преодолении систем защиты отказ может не произойти, если воздействие не нанесло критическое повреждение.

В этом случае следует ввести вероятность критического повреждения при успешном деструктивном воздействии – $P_{кр}$.

Тогда:

$$P(O_i|D_i, N_i) = 1 - (1 - P_{кр})^K,$$

где: K – количество деструктивного воздействия, которое смогло преодолеть системы защиты, выражается через биномиальное распределение $K \sim Bi(N_i, 1 - P_{\Pi})$.

Тогда полная вероятность отказа при внешнем деструктивном воздействии выражается как:

$$P(O_i|D_i, N_i) = \sum_{N=1}^{\infty} P(N) \sum_{K=1}^N P(K) \left(1 - (1 - P_{кр})^K\right).$$

³ Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник. 11-е изд., стер. М.: КноРус, 2010. 658 с

⁴ Казахов Б.Д., Козлов В.В., Лагун А.В. Обоснование показателей для оценки результативности функционирования системы защиты ракетно-космического комплекса в условиях внешнего деструктивного воздействия // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. №675. С. 36-44.

На этапах, связанных с заправкой РКН компонентами ракетного топлива, даже малейшее деструктивное воздействие, которое ведет к повреждению, может привести к взрыву. При этом вероятность катастрофических последствий будет зависеть от места взрыва, качества и количества деструктивного воздействия (рисунок 3).

Используя формулу М.Садовского, можно определить избыточное давление по фронту ударной волны на расстоянии от места взрыва [2]:

$$\Delta P_{\phi} = 0,082 \frac{\sqrt[3]{q}}{R} + 0,265 \frac{\sqrt[3]{q^2}}{R^2} + 0,685 \frac{q}{R^3}.$$

Основным показателем интенсивности действия воздушной ударной волны является давление – ΔP_{ϕ} в ее фронте. Оно зависит от тротилового эквивалента взрываемого заряда q и уменьшается при удалении от эпицентра взрыва примерно пропорционально третьей степени расстояния R .

У каждого объекта и технологического оборудования стартового комплекса есть предельно допустимое значение нагрузки (давления), которое оно может выдержать до полного разрушения.

Значения таких давлений и степень разрушения для некоторых объектов (материалов) представлены в таблице 1.

В таком случае, используя данные таблицы 1, можно оценить вероятность критического повреждения от расстояния R – радиуса распространения ударной волны:

$$P(R) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta P_{\phi} \geq \Delta P_{\text{разр}} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

где: $\Delta P_{\text{разр}}$ – предельно допустимая нагрузка (давление) на объект, которую он может выдержать до полного разрушения.

Таблица 1 – Степени разрушения зданий от избыточного давления при взрывах взрывчатых веществ

Типы зданий	Степени разрушения и избыточные давления, кПа			
	слабые	средние	сильные	полные
Кирпичные и каменные:				
малоэтажные	8–20	20–35	35–50	50–70
многоэтажные	8–15	15–30	30–45	45–60
Железобетонные крупнопанельные:				
малоэтажные	10–30	30–45	45–70	70–90
многоэтажные	8–25	25–40	40–60	60–80
Железобетонные монолитные:				
многоэтажные	25–50	50–115	115–180	180–250
повышенной этажности	25 – 45	45 – 105	105–170	170–215
Железобетонные крупнопанельные с железобетонным и металлическим каркасом и крановым оборудованием грузоподъемностью, т:				
до 50	5–30	30–45	45–75	75–120
от 50 до 100	15–45	45–60	60–90	90–135
Здания со стенами типа «Сэндвич» и крановым оборудованием грузоподъемностью до 20 т	10–30	30–50	50–65	65–105
Складские помещения с металлическим каркасом и стенами из листового металла	5–10	10–20	20–35	35–45

В общем случае, как уже упоминалась выше, описать уязвимость СК можно матрицей вероятностных переходов в различные конечные состояния при различных деструктивных воздействиях.

Касаемо стартового комплекса, можно выделить деструктивное воздействие на следующие этапы: транспортировка, установка РКН, подвод средств обслуживания, заправка и предпусковой этап подготовки РКН к пуску [3].

Конечное состояние этапов также можно разделить на следующие сценарии (рисунок 4):

C_K – успешное завершение этапа (без последствий);

C_1 – частичное повреждение (срыв технологического графика подготовки РКН, ремонт);

C_2 – разрушение РКН, СК без взрыва (РКН не заправленная);

C_3 – полное разрушение РКН, СК (взрыв заправленной ракеты).

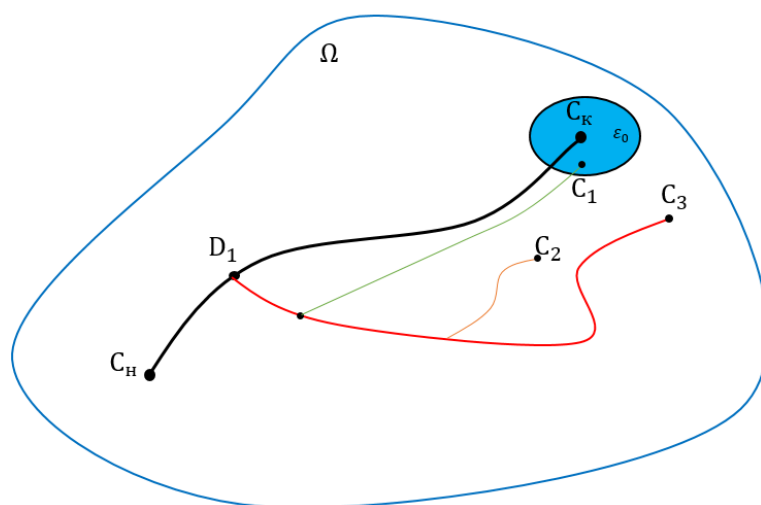


Рисунок 4 – Развитие сценария состояния СК после деструктивного воздействия

Обобщенная матрица уязвимости для всех этапов и исходов будет иметь вид:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{01} & Y_{02} & Y_{03} \\ Y_{10} & Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{50} & Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} \end{bmatrix}.$$

В данной матрице строки соответствуют этапам:

- 0-я строка характеризует бездействие, отсутствие работ,

- 1-5 строки характеризует этапы транспортировки, установки, подвода средств обслуживания, заправки и предпусковые работы соответственно.

Столбцы соответствуют конечным состояниям ($C_K - C_3$).

Элемент $Y_{ij} = P(C_j|D_i)$, где: D_i – тип деструктивного воздействия на i -ом этапе, C_j – конечное состояние этапа, например, частичное разрушение, полное разрушение, срыв пуска, то есть вероятность перехода начального состояния на этапе i в состояние j .

Основываясь на предложенном подходе, можно оценить условные переходы в эти состояния при деструктивном воздействии.

При этом также можно рассчитать общий риск (ожидаемый ущерб), который будет вычисляется как [4; 5]:

$$Ri = \sum_i P(D_i) \sum_j Y_{ij} U_j,$$

где: U_j – ущерб от состояния C_j .

Алгоритм расчета уязвимости стартового комплекса на этапах функционирования

Расчет уязвимости СК проводим согласно алгоритму, изображенному на рисунке 5. Расчет уязвимости проводится для различных этапов функционирования СК при подготовке РКН к пуску.

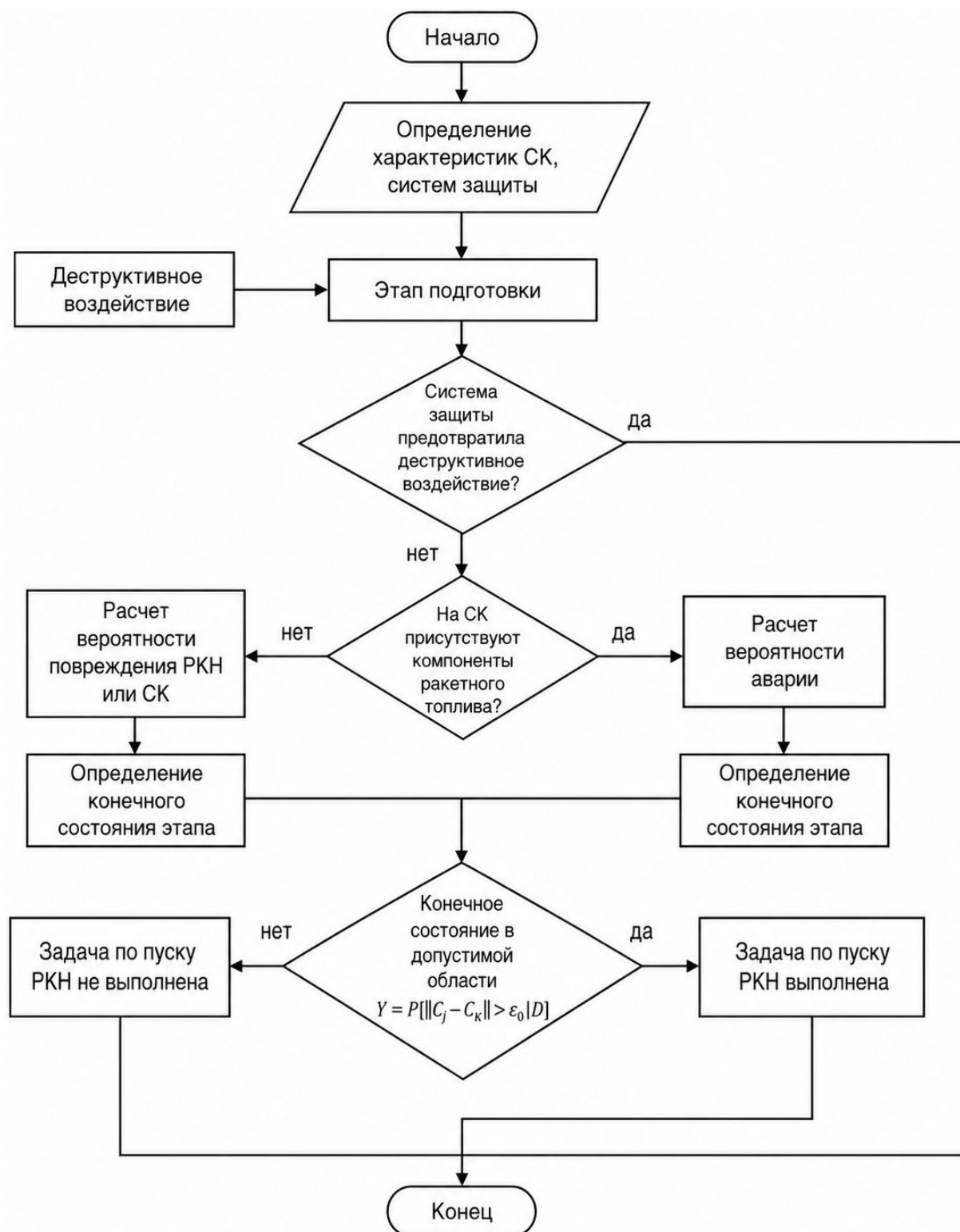


Рисунок 5 – Алгоритм расчета уязвимости стартового комплекса на этапах функционирования

Для этапов, где проводятся работы с КРТ:

1. Задаем мощность деструктивного воздействия через тротиловый эквивалент q (кг).
2. Определяем минимальное расстояние $L_{без}$, при котором $\Delta P = \Delta P_{разр}$.
3. Определяем площадь критической зоны, она же безопасная зона: $S_{без} = \pi L_{без}^2$.
4. Определяем площадь зоны деструктивного воздействия $S_{СК}$ (территория стартового комплекса).
5. Рассчитываем вероятность того, что деструктивное воздействие попадет в критическую зону: $P_{без1} = \frac{S_{без}}{S_{СК}}$ (если равномерное распределение).
6. Если допущен прорыв K деструктивного воздействия из N , то вероятность хотя бы одного попадания в критическую зону:

$$P_{ц} = 1 - (1 - P_{без1})^K.$$

7. Рассчитываем вероятность аварии:

$$P(C_3|D, N) = P_K.$$

Для этапов без наличия топлива (транспортировка, установка, подвод средств) критическое состояние будет оцениваться через прямое деструктивное воздействие на ракету или ключевое оборудование.

Тогда алгоритм расчета будет выглядеть следующим образом:

1. Определяем уязвимую площадь ракеты/оборудования S_0 .
2. Определяем площадь зоны деструктивного воздействия $S_{СК}$ (территория стартового комплекса).
3. Рассчитываем вероятность поражения при деструктивном воздействии: $P_{без2} = \frac{S_0}{S_{СК}}$.
4. Если допущен прорыв K деструктивного воздействия из N :

$$P(O_j|D_i, N_i) = 1 - (1 - P_{без2})^K.$$

Также для каждого этапа определяются:

1. Длительность этапа T_i .
 2. Параметры деструктивного воздействия:
 - количество деструктивного воздействия N_i подчинено пуассоновскому распределению;
 - мощность q_i ;
 - интенсивность деструктивного воздействия λ_i .
 3. Параметры защиты:
 - вероятность подавления одного деструктивного воздействия $P_{п}$.
 4. Параметры стартового комплекса:
 - для этапов без топлива: уязвимая площадь S_0 и общая площадь $S_{СК}$;
 - для этапов с топливом: критическое избыточное давление $\Delta P_{разр}$ и радиус распространения ударной волны R , общая площадь $S_{СК}$, критическое расстояние $L_{без}$ и критическая площадь $S_{без} = \pi L_{без}^2$.
- Условная вероятность отказа при деструктивном воздействии:
- для этапа без топлива:

$$P(O_j|D_i) = \sum_{n=1}^{\infty} P(N_i) \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} (1 - P_{п})^k P_{п}^{n-k} \left[1 - \left(1 - \frac{S_0}{S_{СК}} \right)^k \right],$$

- для этапов с топливом (рассматривается только катастрофическое состояние):

$$P(O_j|D_i) = \sum_{n=1}^{\infty} P(N_i) \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} (1 - P_{п})^k P_{п}^{n-k} \left[1 - \left(1 - \frac{S_{без}}{S_{СК}} \right)^k \right].$$

Заключение

Предложенная методика основана на определении уязвимости как условной вероятности отказа при деструктивном воздействии, методика учитывает случайное количество деструктивного воздействия, вероятность нанесения критического повреждения СК.

Для этапа подготовки РКН, где присутствуют работы с КРТ, используется физическая модель распространения ударной волны для определения критической зоны поражения от возможной аварийной ситуации.

Применение данного математического аппарата позволит сделать анализ и провести оценивание нанесенного ущерба СК и его технологическому оборудованию, а также вероятности выполнения задачи по осуществлению пуска РКН.

Список источников

1. Резников Д.О., Махутов Н.А. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска // Проблемы анализа риска. 2008. Т.5. №3. С. 72-85.
2. Технические основы эффективности ракетных комплексов: монография / Под ред. Е.Б. Волкова. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
3. Казахов Б.Д., Козлов В.В., Лагун А.В. Методика оценивания уровня влияния внешнего деструктивного фактора на безопасность эксплуатации сложного группового объекта // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2021. №678. С. 250-262.
4. Краснов О.В. Методы и модели исследования безопасности эксплуатации стартовых комплексов. СПб.: ВКУ, 2000. 130 с.
5. Смирнов В.И. Методология обеспечения безопасности стартовых комплексов при их проектировании: монография. М.: МАИ, 2003. 140 с.

Информация об авторах

- В.В. Козлов – доктор технических наук, профессор.
А.В. Лагун – кандидат технических наук, доцент, SPIN 2473-4540.
А.Д. Сыров – SPIN 5469-2477.