УДК 629.764.017.1:005.334 https://doi.org/10.15407/itm itm2020.01.031

**Э. Г. ГЛАДКИЙ**

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РИСКА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ ИХ ОБВАЛОВКИ В СЛУЧАЕ АВАРИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ПОЛЕТА

*Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное"*
*Государственное космическое агентство Украины.*
*ул. Криворожская, 3, г. Днепр, Украина, 49008; e-mail: edgladky@gmail.com*

У разі аварії ракети-носія(РН)/ракети космічного призначення (РКП) на старті або на початковій ділянці польоту на найбільшу небезпеку наражаються об’єкти і системи стартового комплексу (СК). Для підвищення збереження таких об’єктів використовують різноманітні заходи, що забезпечують підвищення їх стійкості до уражальних факторів аварійної РН і, насамперед, вибухової ударної хвилі. Одним із способів такого підвищення стійкості є обвалування об’єкта з однієї або кількох сторін або використання спеціальних захисних перешкод. Цим знижується рівень тиску у фронті вибухової ударної хвилі, що надходить на захищену сторону об’єкта.

В статті розроблено математичні моделі оцінювання ризику (ймовірності ураження) об’єкта СК з урахуванням обвалування його елементів. При цьому зона об’єкта зображається у вигляді опуклого багатокутника. На прикладі фронтальної по відношенню до точки старту РН сторони об’єкта розглянуто два типи обвалування в залежності від його довжини і запропоновано відповідні геометричні моделі зображення зони ураження такого об’єкта. У першому випадку, коли довжина обвалування значно перевищує довжину сторони об’єкта, для оцінювання ризику зона ураження поділяється на дві частини: багатокутник (враховує початкову захищеність об’єкта) та прямокутник, що відповідає обвалованій стороні, який враховує зниження дії ударної хвилі завдяки обвалуванню. У другому випадку, коли безпосередньо обвалована сторона об’єкта, зону ураження запропоновано ділити на кілька окремих фігур: багатокутник зони об’єкта і трапеції, що побудовані на сторонах об’єкта. Трапеція, яка відповідає обвалованій фронтальній стороні, враховує зниження дії ударної хвилі за рахунок обвалування. Виходячи із запропонованого подання зони ураження обвалованого об’єкта, побудовано розрахункові співвідношення для оцінювання ризиків.

В якості прикладу проведено оцінювання ймовірності ураження для двох об’єктів СК ракетно-космічного комплексу «Циклон-4М»: обладнання майданчику системи заправки рідким киснем та споруди системи термостатування.

***Ключові слова:*** *ракета-носій; польотна безпека; аварія ракети носія на етапі польоту; зона падіння аварійної ракети носія; ризик; обвалування.*

Наибольшей опасности в случае аварии ракеты-носителя(РН)/ракеты космического назначения (РКН) на старте или начальном участке полета подвергаются объекты и системы стартового комплекса (СК). Для повышения сохранности таких объектов используются различные мероприятия, связанные с увеличением их стойкости к поражающим факторам аварийной РН и, прежде всего, взрывной ударной волны. Одним из способов такого повышения стойкости является обваловка объекта с одной или нескольких сторон или использование специальных защитных преград. Этим снижается уровень давления во фронте взрывной ударной волны, приходящей на защищенную сторону объекта.

В статье разработаны математические модели оценки риска (вероятности поражения) объекта СК с учетом обваловки его элементов. При этом зона объекта описывается выпуклым многоугольником. На примере фронтальной по отношению к точке старта РН стороны объекта рассмотрены два типа обваловки в зависимости от ее длины и предложены соответствующие геометрические модели представления зоны поражения такого объекта. В первом случае, когда длина обваловки значительно превосходит длину стороны объекта, для оценки риска зона поражения разбивается на две части: многоугольник (учитывает начальную защищенность объекта) и прямоугольник, соответствующий обвалованной стороне, который учитывает снижение действия ударной волны за счет обваловки. Во втором случае, когда обвалована непосредственно сторона объекта, зону поражения предложено разбивать на несколько отдельных фигур: многоугольник зоны объекта и трапеции, построенные на сторонах объекта. Трапеция, соответствующая обвалованной фронтальной стороне, учитывает снижение действия ударной волны за счет обваловки. Исходя из предложенных представлений зон поражения обвалованного объекта, построены расчетные соотношения для оценки рисков.

В качестве примера проведена оценка вероятности поражения для двух объектов СК ракетно-космического комплекса «Циклон-4М»: оборудования площадки системы заправки жидким кислородом и сооружения системы термостатирования.

***Ключевые слова:*** *ракета-носитель; полетная безопасность; авария ракеты-носителя на этапе полета; зона падения аварийной ракеты-носителя; риск; обваловка.*

Launch complex (LC) facilities and systems run the highest risk in the case of a launch vehicle / integrated launch vehicle accident at lift-off or at the initial flight phase. Various measures are taken to improve their safety by increasing their resistance to a failed launch vehicle' damaging factors, first and foremost, an explosion shock wave. A way to do so is to berm a facility on one or several sides or to use special protective barriers. This reduces the pressure in the explosion shock wave front incident onto the protected side of the facility.

This paper presents mathematical models of risk (damage probability) assessment for a bermed launch complex facility. The facility area is described by a convex polygon. Using the example of the side of a facility facing the launch vehicle launch point, two berm types depending on the berm length are considered, and geometrical models are proposed to represent the damage area of the facility. In the first case where the berm length is far longer than the facility side length, for the risk to be assessed the damage area is split into two parts: a polygon, which accounts for the initial safety of the facility, and a rectangle, which corresponds to the bermed side and accounts for the berm-caused reduction of the shock effect. In the second case where the berm length is equal to the facility side length, the damage area is split into several figures: a polygon (the facility area) and trapezoids constructed on the facility sides. The trapezoid that corresponds to the bermed side facing the launch point accounts for the berm-caused reduction of the shock effect. Based on the proposed representations of the damage areas of a bermed facility, relationships to calculate the risk are proposed.

As an example, damage probability assessment is made for two facilities of the Cyclone-4M launch complex: a liquid oxygen filling system and a thermostating system.

***Keywords:*** *launch vehicle, flight safety, in-flight launch vehicle accident, failed launch vehicle fall area, risk, berm.*

**Введение.** Обеспечение безопасности при проведении пусков современных ракет-носителей (РН) является приоритетной задачей. В настоящее время обеспечение безопасности при эксплуатации опасных объектов, таких как РН, используется риск-ориентированный подход и концепция «приемлемого риска» [6]. Безопасность для объектов и людей обеспечивается, если для них не нарушаются количественные требования к уровню риска. Последние устанавливаются национальными и международными нормами (смотри, например [7, 8]). Таким образом, для организации эффективного процесса обеспечения безопасности при эксплуатации опасных объектов необходимо совершенствование расчетных методик оценки рисков.

**Постановка задачи.** В случае аварии РН при старте и на начальном участке полета наибольшей опасности подвергаются объекты и системы наземного комплекса (НК) и, прежде всего, стартового комплекса (СК). Стартовый комплекс представляет совокупность стационарных и подвижных средств и сооружений, предназначенных для подготовки к запуску и пуску РН. Традиционно СК выполняется в виде единого сооружения со стартовым столом, внутри которого расположены большая часть участвующих в подготовке пуска РН технологических систем и агрегатов. Это сооружение обладает повышенной защищенностью к поражающим факторам аварийной РН. В то же время некоторые агрегаты и технологические системы СК могут располагаться на некотором удалении от стартового сооружения (точки старта). Заметим, что в непосредственной близости от точки старта также могут располагаться командный пункт и другие сооружения ракетно-космического комплекса (РКК).

Высокие риски для указанных объектов обусловлены, с одной стороны, высокой вероятностью отказа РН на начальном участке полета первой ступени, а с другой, падением неразрушенной аварийной РН с практически полными запасами топлива. Как следствие, такое падение аварийной РН будет сопровождаться мощным взрывом и сильным пожаром.

Для снижения вероятности уничтожения объектов наземного комплекса, расположенных в непосредственной близости от точки старта, проводится комплекс мероприятий, повышающих их стойкость к поражающим факторам, возникающим при взрыве РН на старте или при падении аварийной РН, и, прежде всего, взрывной ударной волны. Одним из наиболее эффективных способов снижения такого негативного воздействия является размещение объектов на достаточном удалении от точки старта в направлении противоположном направлению пуска РН. Таким образом, чаще всего обеспечивается безопасность для командного пункта. К сожалению, для объектов СК это может привести к необходимости проводить к точке старта гидравлические, пневматические и электрические коммуникации, что значительно повысит стоимость СК, а в некоторых случаях может быть принципиально невозможным, исходя из непосредственного участия этих систем в подготовке РН к пуску. Исходя из этого, основным способом снижения риска для объектов СК является повышение их стойкости путем увеличения толщины стен сооружений или заглубления объектов на некоторую глубину (возможно использование обоих этих вариантов повышения стойкости). Указанные мероприятия также способствуют значительному удорожанию СК.

Еще одним способом снижения риска поражения для сооружений и технологических систем СК в случае аварии РН при ее падении и взрыве является снижение нагрузок на них путем их обваловки (обвалования) или использования защитной преграды со стороны точки старта. В качестве примера на рисунках 1 и 2 показаны стартовые позиции РН Atlas 5 и Falcon (США), где видна обваловка и защитные преграды для некоторых объектов СК.


Рис. 1 – Стартовая площадка РН Atlas-5 (США).


Рис. 2 – Стартовая площадка РН Falcon (компания SpaceX, США)

Отметим, что обваловка также широко используется для защиты резервуаров ГСМ, складов боеприпасов и других объектов. Так, обваловка объектов хранения боеприпасов предназначена для их защиты от горизонтально летящих осколков и ослабления разрушающего действия ударной волны в случаях взрыва на соседних объектах или прилегающих территориях за пределами обвалования.

Ударная волна, образующаяся при взрыве аварийной РН, при достижении обваловки (защитной преграды) будет обтекать ее, образуя в следе за ней зону пониженного давления. Это позволяет значительно снизить нагрузки на защищаемый объект. В [4] указывается, что если защищаемый объект расположен непосредственно за преградой, стоящей на пути распространения взрывной ударной волны, то безопасное расстояние может быть уменьшено до 2 раз (здесь под безопасным расстоянием понимается расстояние до эпицентра взрыва, начиная с которого образующаяся при взрыве ударная волна является безопасной).

В литературе отсутствуют специальные методические подходы к оценке риска поражения объектов НК в случае использования обваловки для повышения их стойкости. Для оценки риска поражения обвалованных объектов, например, может быть использована универсальная методика, предложенная в [3]. В этой работе зона поражения объекта заменяется дискретным набором точек, точнее – элементарных площадок. При этом такое представление заметно затрудняет процедуру расчета, поскольку для различных моментов аварии РН (различный запас топлива на борту) будет различаться и набор соответствующих точек, описывающих зону поражения объекта. Также авторы указывают, что указанная методика встречает трудности при использовании для аварий РН на начальном участке полета в условиях вертикального полета и введения в алгоритм системы безопасности полета РН блокировки аварийного выключения двигателя (АВД) для повышения сохранности стартового сооружения.

**Результаты исследования.** Построим математическую модель оценки вероятности поражения обвалованного объекта СК в случае аварии РН на этапе полета. Координаты вершин зоны объекта в стартовой системе координат, а также его стойкость к взрывной ударной волне считаются известными. Для простоты будем полагать, что обвалована только фронтальная сторона объекта (сооружения) СК и при этом обваловка непосредственно примыкает к грани объекта (в противном случае необходимо будет учесть расстояние между гранью объекта и обваловкой).

В общем случае риск для наземного объекта в случае аварии РН на этапе полета и ее падении может быть определен по формуле:

$$R = Q \sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} P_{\Delta t_j} \frac{1}{\Delta t_j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R_{ЗПО}(t) dt \,, \qquad (1)$$

где $Q$ – вероятность возникновения аварийного отказа на этапе полета ступени; $P_{\Delta t_j}$ – вероятность возникновения аварийного отказа в $j$-том интервале времени полета $[t_{j-1}, t_j]$; $\Delta R_{ЗПО}(t)$ – вероятность попадания аварийной РН в зону поражения объекта (функция поражения объекта) при возникновении аварии в момент времени $t$.

Зона поражения объекта (ЗПО) требует разъяснения. Наиболее общим представлением в плане наземных объектов, которым может быть нанесен ущерб, является использование многоугольника [1] (многоугольник $A_1A_2A_3A_4A_5$ на рис. 3). Для некоторого произвольного момента аварии РН *t* ЗПО будет представлять подобную фигуру, отстоящую от контура объекта на некоторое расстояние, соответствующее радиусу поражения ($R_П$).

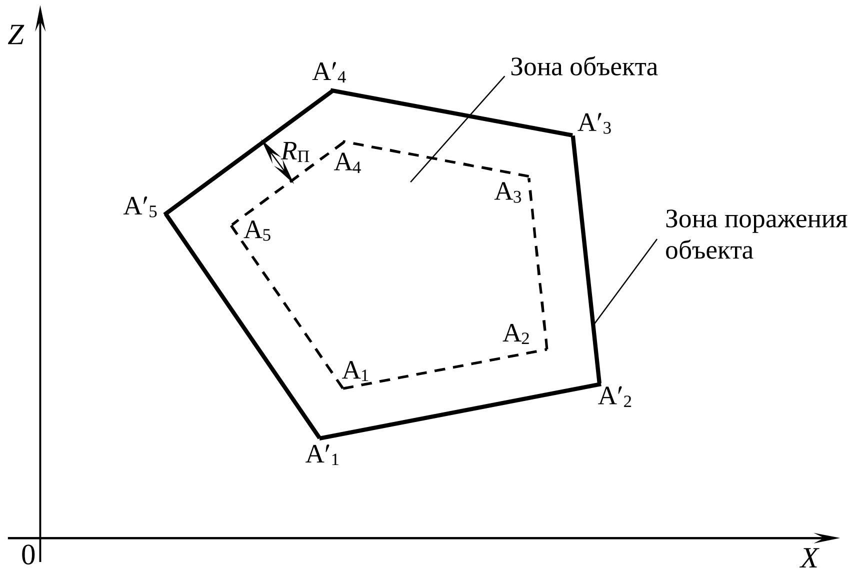



Рис. 3 – Представление зоны поражения объекта

Вершины подобного многоугольника $A_i'(x_i, z_i)$ $i = \overline{1, N_O}$ ($N_О$ – количество вершин многоугольника, представляющего объект в плане) являются точками пересечения пар прямых, параллельных соответствующим смежным сторонам, и лежат на биссектрисах внутренних углов $A_i$ исходного многоугольника. С увеличением длительности полета величина радиуса поражения $R_П$ при падении неразрушенной аварийной РН уменьшается (вследствие уменьшения запасов топлива на борту), как следствие, уменьшается и площадь ЗПО.

Для оценки риска выпуклый многоугольник, описывающий ЗПО, разбивается на треугольники. В итоге риск поражения для объекта может быть определен как сумма

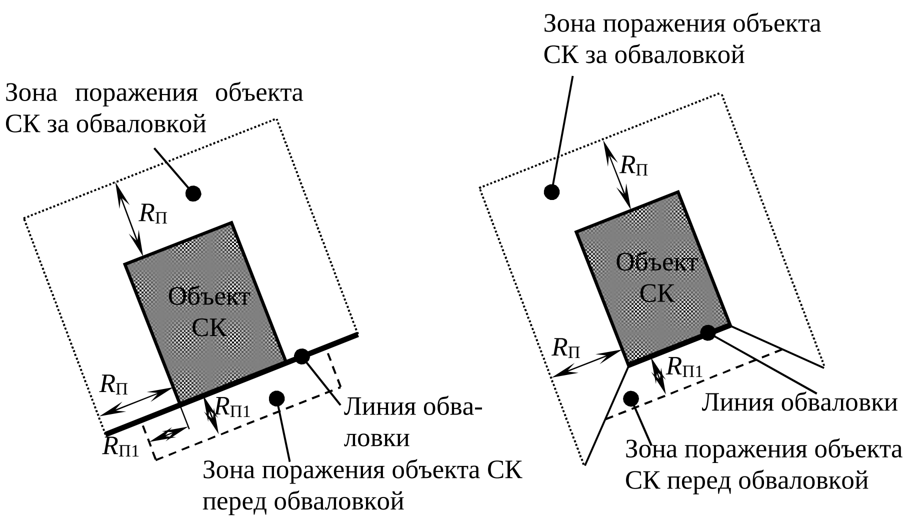
$$R_O = \sum_{N_O - 2} R_{\Delta i}\ , \tag{2}$$

где $R_{\Delta_i}$ – вероятность попадания аварийной РН в *i*-тый треугольник, составляющий многоугольник ЗПО. Количество треугольников, составляющих многоугольник, будет равно $N_О$ - 2. Вероятности $R_{\Delta_i}$ для произвольного момента аварии РН могут быть определены с использованием подхода, представленного в работе [1]. Так, для каждого момента времени аварийного прекращения полета вероятность попадания аварийной РН (или ее фрагментов) в пределы треугольника может быть определена по формуле

$$R_\Delta = \iint_\Delta f_{X,Z}(x, z; m_X(t), m_Z(t), \pm_X(t), \pm_Z(t))dxdz\,,$$

где $f_{X,Z}(x, z;\bullet)$ – функция плотности распределения случайной величины точек падения аварийной РН; $m_X(t)$, $m_Z(t)$, $\pm_X(t)$, $\pm_Z(t)$ – центры рассеивания и средние квадратические отклонения разброса точек падения аварийной РН (ее фрагментов) в продольном и боковом направлениях для момента времени возникновения аварии $t$. Традиционно принимается, что рассеивания точек падения аварийных РН в продольном и боковом направлении являются независимыми и подчиняющимися одномерным нормальным законам.

В случае если обвалована фронтальная по отношению к точке старта РН сторона объекта, ЗПО может быть представлена двумя способами, как показано на рисунке 4. Первое представление характерно для случая, когда длина обваловки значительно превосходит длину фронтальной стороны объекта; второе – когда непосредственно обвалована только указанная грань объекта. В первом случае ЗПО для расчетов может быть представлена в виде двух отдельных составных частей (зон), как показано на рис. 5а). Первая зона – за обваловкой – фактически представляет подобный многоугольник, который получается для радиуса поражения ($R_П$), соответствующего собственной стойкости объекта, за исключением обвалованной стороны объекта. Для нее сторона многоугольника совпадает с обвалованной стороной объекта. Вторая зона – перед обваловкой - представляет прямоугольник шириной $R_{П1}$ (соответствует радиусу поражения, определяемого с учетом ослабления ударной волны, действующей на объект, за счет обваловки), а его длина соответствует обвалованной стороне объекта, увеличенной на $2R_{П1}$.




**а)** **б)**

Рис. 4 – Геометрическое представление ЗПО обвалованного объекта

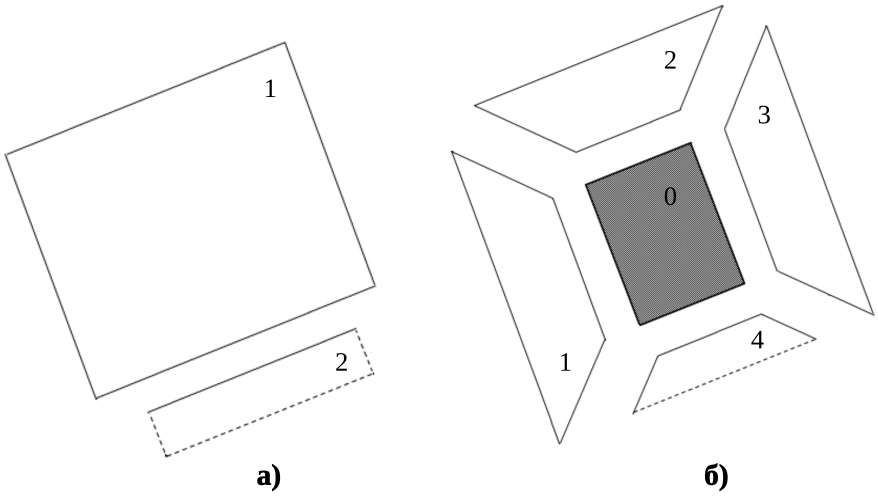



Рис. 5 – Разбиение зоны поражения обвалованного объекта на составные части для оценки вероятности поражения в случае аварии РН

С учетом разбиения зоны поражения обвалованного объекта на две части (рисунок 5а)) риск для него может быть определен следующим образом:

$$R = Q\sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} P_{\Delta t_j} \frac{1}{\Delta t_j}\left[\int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R_{ЗПО_1}(t)dt + \int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R_{ЗПО_2}(t)dt\right], \qquad (3)$$

где $\Delta R_{ЗПО_1}(t)$ – вероятность попадания аварийной РН в первую зону поражения объекта (за обваловкой) при возникновении аварии в момент времени $t$; $\Delta R_{ЗПО_2}(t)$ – вероятность попадания аварийной РН во вторую зону поражения объекта (перед обваловкой).

Для расчета риска во втором случае ЗПО может быть разбита на $N_О + 1$ составную часть (рисунок 5б)): собственно, контур объекта (зона 0; ее размеры не зависят от радиуса поражения) и зон, построенных на сторонах объекта (зоны 1 – 4). Последние представляют трапеции, у которых высоты соответствуют радиусам поражения $R_П$ и $R_{П1}$. В итоге вероятность поражения объекта СК может быть определена по формуле

$$R = Q\sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} P_{\Delta t_j} \frac{1}{\Delta t_j}\left[\int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R_{ЗПО_0}(t)dt + \sum_{i=1}^{N_o}\int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R_{ЗПО_i}(t)dt\right], \qquad (4)$$

где $\Delta R_{ЗПО_0}(t)$ представляет вероятность прямого попадания аварийной РН в объект при возникновении аварии в момент времени $t$; $\Delta R_{ЗПО_i}(t)$ – вероятность попадания аварийной РН в $i$-ую зону (смотри рисунок 5б).

Определение составляющих $\Delta R_{ЗПО_1}(t)$, $\Delta R_{ЗПО_2}(t)$ в (3), а также $\Delta R_{ЗПО_0}(t)$, $\Delta R_{ЗПО_i}(t)$ в (4) в общем случае проводится с использованием процедуры в соответствии с формулой (2).

В ряде случаев объект может быть обвалован с трех сторон, таким образом, защищенными будут фронтальная и боковые стороны. Это позволит еще более существенно снизить риск для объекта в случае аварии РН на этапе полета. Расчетная модель для оценки риска будет практически совпадать с рассмотренной выше с той лишь разницей, что теперь ЗПО с трех сторон будет формироваться радиусом $R_{П1}$ и лишь для тыльной стороны она будет определяться исходя из собственной стойкости объекта ($R_П$).

В качестве примера рассмотрена оценка риска для объектов СК РКК «Циклон-4М» (показаны на рис. 6): площадки системы заправки жидким кислородом (СЗЖК) и сооружения системы термостатирования с учетом их возможной или имеющейся обваловки.

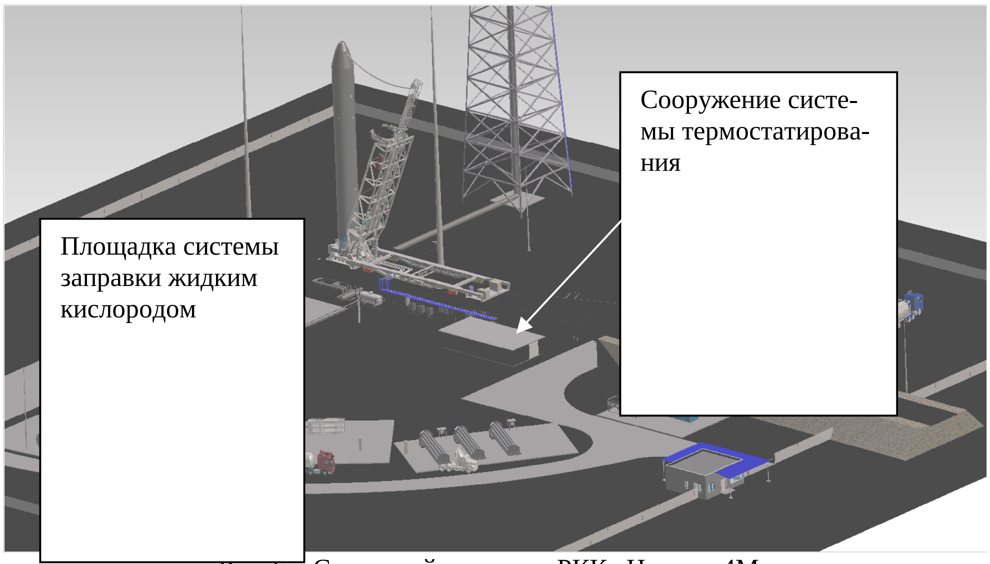



Рис. 6 – Стартовый комплекс РКК «Циклон-4М»

На площадке СЖЗК оборудование расположены открыто. В расчетах площадка СЗЖК с оборудованием рассматривалась как единый объект поражения.

Для открыто расположенного оборудования СЗЖК (трубопроводов, резервуаров, цистерн, арматуры и др.) разрушение будет происходить при уровнях давления (0,05 – 0,15) кгс/см$^2$ (в расчетах принято 0,1 кгс/см$^2$). Сооружение системы термостатирования обладает стойкостью к взрывной ударной волне 0,2 кгс/см$^2$.

Для РКН «Циклон-4М» прочностные расчеты показывают, что в случае возникновения аварийного отказа до (70 – 80) с полета аварийная РКН после АВД, вероятнее всего, будет достигать поверхности Земли без разрушения. Радиусы поражения от действия взрывной ударной волны при падении аварийной РКН «Циклон-4М» рассчитывались с использованием [5] и для рассматриваемых оборудования СЗЖК и сооружения системы термостатирования в зависимости от времени аварии РКН приведены на рисунке 7.

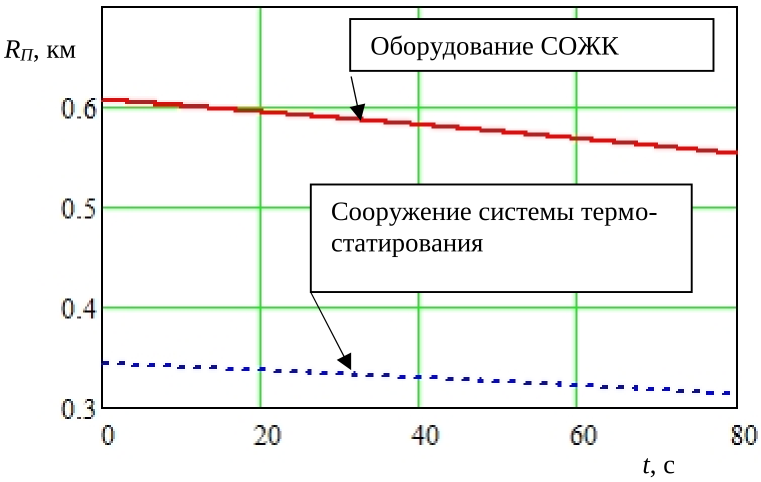



Рис. 7 – Радиусы поражения объектов НК РКК «Циклон-4М» при воздействии на них взрывной ударной волны

Вероятность аварийного отказа РКН «Циклон-4М» на этапе полета первой ступени составляет 0,013. В расчетах принята модель распределения отказов на этапе полета первой ступени в соответствии с [1].

Данные по зонам падения аварийной РКН «Циклон-4М» на начальном этапе полета после АВД для различных моментов аварийного отказа ($t_{АО}$), полученные с использованием баллистических расчетов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики рассеивания точек падения аварийной РКН «Циклон-4М» после АВД (без учета блокировки АВД на начальном участке траектории)

| $t_{АО}$, с | Дальность падения, $m_X$, км | Предельные отклонения точек падения аварийной РКН (соответствуют ±3σ) | |
|---|---|---|---|
| | | По дальности ±$\Delta L_x$, км | По боковому направлению ±$\Delta L_z$, км |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0,01 | 0,05 | 0,05 |
| 20 | 0,03 | 0,07 | 0,07 |
| 30 | 0,17 | 0,46 | 0,41 |
| 40 | 0,66 | 0,86 | 0,76 |
| 50 | 1,83 | 1,38 | 1,21 |
| 60 | 4,42 | 2,60 | 2,24 |
| 70 | 8,88 | 3,46 | 3,16 |
| 80 | 16,34 | 4,45 | 4,29 |

В расчетах также учитывалась блокировка АВД в случае аварии РКН «Циклон-4М» на начальном участке полета, которая составляла 30 с в случае, когда аварийная РКН уходит в секторе +90°; -90° от направления пуска, и 15 с в случае, если аварийная РКН летит в противоположном секторе. При определении рисков в этом случае в дополнении к формулам (3) и (4) использовались соотношения из работы [2], которые для рассматриваемых способов разбиения ЗПО позволяют учесть блокировку АВД в случае аварии РКН на начальном участке полета.

Расположение площадки СЗЖК относительно точки старта по отношению к направлению пуска РКН «Циклон-4М» на солнечно-синхронную орбиту показано на рис. 8. Расстояние от точки старта РКН до ближайшей точки площадки составит ~70 м, а ее площадь – 765 м$^2$.

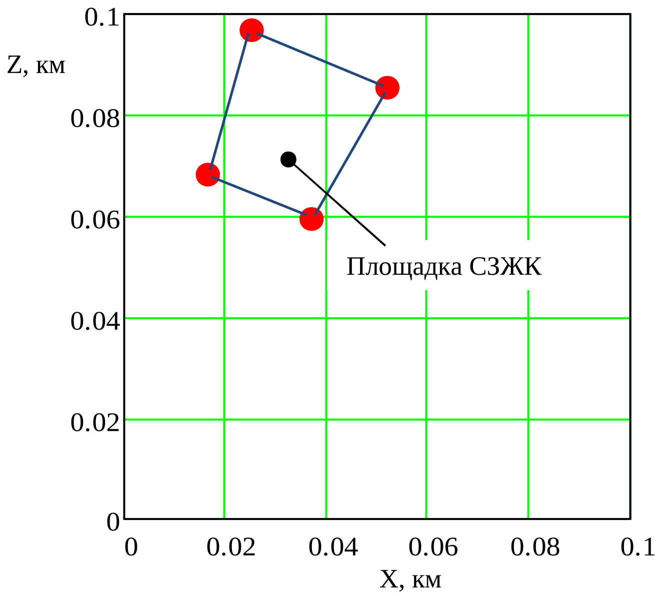



Рис. 8 – Расположение площадки СЗЖК наземного комплекса РКК «Циклон-4М»

С учетом всех исходных данных вероятность поражения оборудования СЗЖК в случае аварии РКН на этапе полета в соответствии с (4) составит 1,53·10$^{-4}$. Теперь предположим, что с фронтальной стороны выполнена обваловка, которая обеспечивает защиту оборудования при падении и взрыве РКН «Циклон-4М». При этом принималось, что обваловка снижает уровень воздействующей ударной волны в ≈2 раза. В рамках сделанных предположений риск для оборудования СЗЖК в случае аварии РКН на этапе полета снизится и составит величину 1,36·10$^{-4}$. Обваловка площадки СЗЖК с трех сторон позволяет уменьшить риск для оборудования до величины 1,04·10$^{-4}$.

Сооружение системы термостатирования (рисунок 6) наиболее близко расположено к точке старта РКН «Циклон-4М» (36 м от точки старта) и имеет площадь 120 м$^2$. У боковой стороны сооружения находится подъездная насыпь, с использованием которой РКН «Циклон-4М» транспортируют на точку старта. Она намного превышает размер боковой стороны объекта и создает для него естественную защиту с боковой стороны, ослабляя действие взрывной ударной волны, в случае падения аварийной РКН за насыпью. Риск для сооружения системы термостатирования с учетом защитной насыпи, получаемый с использованием (3), равен 5,17·10$^{-5}$. В случае, если не учитывать защитную насыпь, риск для сооружения системы термостатирования составит 7,82·10$^{-5}$. Если дополнительно будет обвалована фронтальная сторона сооружения системы термостатирования, вероятность поражения не превысит $4{,}0 \cdot 10^{-5}$.

Более низкие значения риска для сооружения системы термостатирования обусловлены меньшей площадью и более высокой стойкостью к ударной волне.

**Выводы.** В статье разработаны математические модели оценки риска для объектов СК, стойкость которых к ударной волне увеличена путем использования обваловки. Они позволяют учесть различную длину используемой для защиты стороны объекта обваловки, а также наличие обваловки у нескольких сторон объекта. На примере РКК «Циклон-4М» показано снижение риска для двух объектов при использовании обваловки.


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. Днепропетровск: ГПКБЮ, 2015. Вып. 3. С. 50–56.
2. *Гладкий Э. Г., Перлик В. И.* Выбор интервала времени блокировки аварийного выключения двигателя на начальном участке полета первой ступени. Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2011. Вып. 2. С. 266–280.
3. *Компаниец Э. П., Дронь Н. М., Белозеров В. Е.* Баллистическое обеспечение пусков ракет-носителей: монография. Днепропетровск: ДНУ, 2010. 468 с.
4. ПБ 13-01-92 Единые правила безопасности при взрывных работах.
5. *Стоєцький В. Ф., Дранишников Л. В., Есипенко А. Д. та ін.*Управління техногенною безпекою об’єктів підвищеної небезпеки. Тернопіль: видавництво «Астон», 2006. 408 с.
6. *Хенли Э., Джм Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска: Под общ. ред. *В. С. Сыромятникова*. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
7. ДСТУ ISO 14620-1:2008. Космічні системи. Вимоги безпеки. Частина 1. Безпечність системи (ISO 14620-1:2002, IDT). [Чинний від 01.10.2008]. Київ, 2009. 38 с.
8. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C – Licensing, part 417 – Launch Safety, 2001 [Электронный ресурс]. URL: http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-417.



Получено 28.12.2019,
в окончательном варианте 17.02.2020