

**Э. Г. Гладкий**

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»  
им. М. К. Янгеля», Днепро, Украина

## ОЦЕНКА РИСКА ПОРАЖЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА В СЛУЧАЕ АВАРИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА ЭТАПЕ ПОЛЕТА

*В зонах падения аварийных ракет-носителей (РН) могут находиться магистральные газо- и нефтепроводы, железные дороги, линии электропередачи, реки и т. п. Нанесение повреждений таким промышленным объектам, как газо- и нефтепроводы, при падении аварийной РН может привести к катастрофическим последствиям. Так, повреждение и разрыв магистрального газопровода приведет к утечке транспортируемого природного газа с последующим мощным взрывом и сильным пожаром. В расчетах безопасности такие объекты должны рассматриваться как линейные (для них один из геометрических размеров существенно больше другого) и они представляют частный случай площадного объекта (традиционно безопасность при пусках РН рассматривается для площадных наземных объектов). В статье разработана математическая модель оценки безопасности для магистрального трубопровода в случае аварии РН на этапе полета. Для оценки безопасности часть трубопровода, находящуюся в зоне падения аварийной РН, предложено представлять в виде совокупности отдельных прямолинейных участков (отрезков). Тогда общий риск поражения трубопровода равняется сумме рисков поражения его отдельных прямолинейных участков. Под риском поражения понимается вероятность падения аварийной РН или ее фрагментов в зону поражения прямолинейных участков трубопровода. Построена геометрическая модель и получены математические выражения для оценки риска поражения отдельного прямолинейного участка трубопровода. В качестве примера показана процедура оценки риска поражения для магистрального газопровода «Бухара — Урал», который находится в зоне падения аварийных РН «Днепр» и может быть поврежден в случае аварии РН на этапе полета первой ступени. Разработанная математическая модель является универсальной и может быть использована для оценки риска поражения других линейных объектов, находящихся в зоне падения аварийной РН.*

**Ключевые слова:** ракета-носитель, полетная безопасность, зона падения аварийной ракеты-носителя, линейный объект, риск.

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности при пусках ракет-носителей (РН) в настоящее время представляет актуальную задачу. По трассам запуска космических аппаратов (КА) в зонах возможного падения аварийных РН могут находиться населенные территории и различные объекты общественной и частной собственности, которым

может быть нанесен ущерб (полностью исключить нахождение объектов и людей в зонах возможного падения аварийной РН практически невозможно). Используемая в настоящее время концепция «приемлемого риска» допускает нахождение различных объектов и людей в зонах возможного падения аварийных РН при условии неперевышения граничных (допустимых) уровней риска их поражения. Последние устанавливаются международными и национальными

нормами. Так, для наземных объектов, не связанных с космическими программами, риск поражения не должен превышать величины  $10^{-6}$  на один пуск РН [4, 9]. Необходимо отметить, что в процессе анализа полетной безопасности ракетно-космических комплексов под риском поражения объекта понимается вероятность наступления определенного сочетания нежелательных событий, приводящих к аварии РН на этапе полета и поражению (уничтожению) объекта (соответствует катастрофическим последствиям). Подобная трактовка риска, который отождествляется с вероятностью, используется только для катастрофических последствий (в том числе при гибели людей) и отличается от понятия риска, традиционно определяемого как математическое ожидание величины ущерба от потенциально опасных событий.

Традиционно анализ безопасности при пусках РН проводится для наземных объектов, которые рассматриваются как площадные. В то же время в зонах падения аварийных РН могут находиться трубопроводы (магистральные газо- и нефтепроводы), железные дороги, линии электропередачи, реки и т. п. Рассмотренные объекты являются линейными, поскольку для них один из геометрических размеров существенно больше другого (длина трубопровода намного больше его диаметра). Некоторые из таких линейных объектов представляют серьезную опасность, и их разрушение (повреждение) в случае воздействия на них аварийной РН или ее фрагментов при падении может привести к катастрофическим последствиям. К таким опасным объектам, прежде всего, относятся магистральные газо- и нефтепроводы. Так, повреждение (разрыв) магистрального газопровода приведет к утечке транспортируемого под высоким давлением газа с последующим мощным взрывом и сильным пожаром.

## ОБЗОР

Риск поражения наземного объекта в случае возникновения аварии РН на этапе полета определяется интегралом [5]

$$R = Q \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} P_{\Delta t}(t) \cdot \Delta R(t) dt, \quad (1)$$

где  $t_k$  — полное время работы ступени (риск оценивается применительно к этапу полета ступени РН);  $Q$  — вероятность возникновения аварийного отказа (АО) на этапе полета рассматриваемой ступени РН, приводящего к прекращению полета и падению аварийной РН;  $P_{\Delta t}(t)$  — вероятность возникновения АО в момент времени  $t$  (точнее, в интервале  $dt$  в окрестностях точки  $t$ );  $\Delta R(t)$  — вероятность попадания аварийной РН в зону поражения объекта (ЗПО).

Для практических расчетов формулу (1) записывают в виде

$$R = Q \sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} P_{\Delta t j} \cdot \Delta R_{зпо j}, \quad (2)$$

где  $N_{\Delta t}$  — количество интервалов разбиения времени полета ступени;  $P_{\Delta t j}$  — вероятность возникновения АО ступени РН в  $j$ -м интервале времени  $[t_{j-1}, t_j]$ ,  $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$  ( $t_0 = 0$ ;  $t_{N_{\Delta t}} = t_k$ );  $\Delta R_{зпо j}$  — вероятность падения аварийной РН в ЗПО в случае возникновения АО в  $j$ -м интервале времени (в общем случае связано с процедурами интегрирования).

Поскольку использование соотношения (2) прежде всего ориентировано на определение риска поражения площадных объектов, для оценки вероятности  $\Delta R_{зпо j}$  наземные объекты представляют в виде кругов [10], прямоугольников [3, 10] или многоугольников [2]. Хотя линейный объект и может рассматриваться как частный случай площадного объекта, такой подход вряд ли следует считать удовлетворительным решением при определении риска поражения такого протяженного объекта, как трубопровод, который находится в зоне падения аварийных РН.

В работе [5] рассмотрена методика оценки безопасности наземных объектов на базе выражений (1) и (2), которая пригодна, в том числе, и для линейных объектов. В ее рамках ЗПО представляется на карте дискретным набором точек, точнее элементарных площадок, что дает возможность исключить процедуру интегрирования при определении  $\Delta R_{зпо j}$ . Такое представление ЗПО заметно усложняет процедуру оценки риска, поскольку для разных моментов времени будет различаться набор точек, определяющих ЗПО. К тому же расчетная модель строится в предположении, что риск поражения объекта в

случае аварии РН слабо зависит от параметров рассеивания РН или его фрагментов в продольном направлении, а определяется в основном распределением отказов РН по времени полета и параметрами рассеивания в боковом направлении (считаются слабо зависящими от дальности падения аварийной РН). Учитывая, что трубопровод, который попадает в зону падения аварийной РН, может быть существенно растянут по дальности, указанные предположения приведут к погрешности при вычислении риска его поражения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определенности будем рассматривать процедуру определения риска поражения трубопровода, который находится в зоне падения аварийной РН. Повреждение трубопровода, учитывая его нахождение на поверхности (или незначительное заглубление) может вызвать как прямое попадание в него аварийной РН, так и воздействие на него взрывной ударной волны, образующейся при падении и взрыве аварийной РН с компонентами ракетного топлива. Последний случай характерен для аварий РН на этапе полета первой ступени, когда происходит падение неразрушенной аварийной РН или ее ступеней. Здесь необходимо отметить, что в случае аварии РН на этапе полета первой ступени объекты, которые находятся в зоне падения аварийных РН, подвергаются наибольшему риску (на этот случай будем ориентироваться ниже).

### РЕШЕНИЕ

Для оценки риска поражения часть трубопровода, которая попадает в зону падения аварийной РН, представим в виде совокупности отдельных прямолинейных участков (отрезков). В этом случае суммарный риск его поражения определяется суммой

$$R_{\text{тр}} = \sum_{N_{\text{тр}}} R_i, \quad (3)$$

где  $N_{\text{тр}}$  — количество прямолинейных участков трубопровода, попадающих в зону падения аварийной РН,  $R_i$  — риск поражения  $i$ -го прямолинейного участка трубопровода.

Риск поражения каждого прямолинейного участка трубопровода в случае аварии РН по аналогии с риском поражения площадного объекта [3] может быть определен следующим образом:

$$R = Q \sum_{j=1}^{N_M} P_{\Delta t_j} \frac{1}{\Delta t_j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R_{\text{тр}}(t) dt, \quad (4)$$

где  $\Delta R_{\text{тр}}(t)$  — вероятность попадания аварийной РН в зону поражения рассматриваемого участка трубопровода при возникновении аварии в момент времени  $t$ .

Для эксплуатируемых РН вероятность  $Q$  определяется с использованием статистических данных по пускам РН.

Вероятности  $P_{\Delta t_j}^{(i)}$  также могут быть определены с использованием статистических данных о временах возникновения реальных отказов ступеней РН или, например, может быть использована усредненная модель распределения моментов наступления отказов ступени, которая получена на основе обработки статистических данных по отказам ступеней РН разработки Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля». В соответствии с этой статистической моделью (см. рис. 1) 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 отказов на указанных интервалах времени принимается равномерным.

Для определения вероятности  $\Delta R_{\text{тр}}(t)$  необходимо определить зону поражения рассматриваемого прямолинейного участка трубопровода. В общем случае она представляет полосу, показанную на рис. 2, где  $(x_1, z_1)$ ,  $(x_2, z_2)$  — координаты концов прямолинейного участка трубопровода в стартовой системе координат,  $R_{\text{П}}$  — радиус поражения трубопровода.

Величина  $R_{\text{П}}$  будет зависеть, с одной стороны, от стойкости трубопровода к взрывной ударной волне, а с другой — от количества топлива на борту аварийной РН в момент взрыва. Стойкость магистрального трубопровода к воздействию ударной волны определяется его диаметром, толщи-

ной трубы, а также глубиной его залегания. По оценочным данным стойкость трубопровода к внешней взрывной ударной волне может составлять от 0.25 до 1.5 кгс/см<sup>2</sup> [1]. Давление во фронте взрывной ударной при взрыве аварийной РН с остатками компонентов ракетного топлива может быть определено согласно [8].

В случае аварии РН в момент времени  $t$  вероятность поражения одного участка (отрезка) магистрального трубопровода в соответствии с геометрической моделью, показанной на рис. 2, будет определяться выражением

$$\Delta R_{\text{тп}}(t) = \int_{z_1}^{z_2} \int_{x'_1(z)}^{x''_1(z)} f_{x,z}(x, z; t) dx dz, \quad (5)$$

где  $f_{x,z}(x, z; t)$  — совместный закон распределения точек падения аварийных РН в продольном и боковом направлении в случае возникновения АО в момент времени  $t$  (точнее, в интервале времени  $dt$ );  $x'_1(z)$ ,  $x''_1(z)$  — прямые, определяющие границы зоны поражения рассматриваемого участка трубопровода.

В большинстве случаев предполагается независимость рассеивания точек падения аварийных РН в продольном и боковом направлениях и при этом для их описания используются нормальные законы распределения. Поскольку на интервалах  $\Delta t_j$  характеристики рассеивания точек падения аварийных РН изменяются, для описания такого рассеивания в продольном и боковом направлениях будем использовать одномерные нормальные законы распределения с переменными во времени математическими ожиданиями и средними квадратичными отклонениями [6]. В этом случае вероятность (5) для каждого интервала времени  $\Delta t_j$  может быть определена следующим образом:

$$\Delta R_{\text{тп}}(t) = \int_{z_1}^{z_2} \int_{x'_1(z)}^{x''_1(z)} N(x; m_x(t), \delta_x(t)) N(z; m_z(t), \delta_z(t)) dx dz, \quad (6)$$

где  $N(\cdot)$  — плотность одномерного нормального распределения;  $m_x(t)$ ,  $m_z(t)$  — центры рассеивания точек падения аварийных РН в продольном и боковом направлениях для момента времени возникновения аварийного отказа  $t$ ;  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_z(t)$  — средние квадратичные отклонения разброса то-

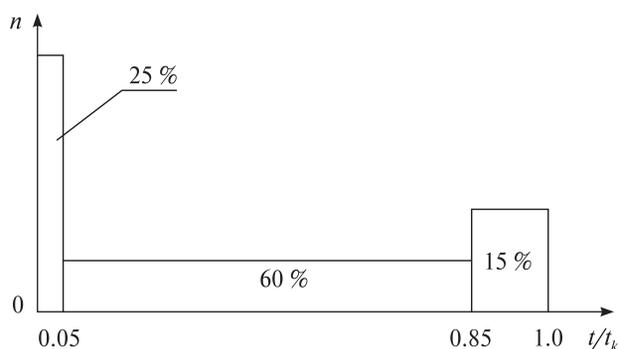


Рис. 1. Распределение относительного числа  $n$  отказов по времени работы I ступени

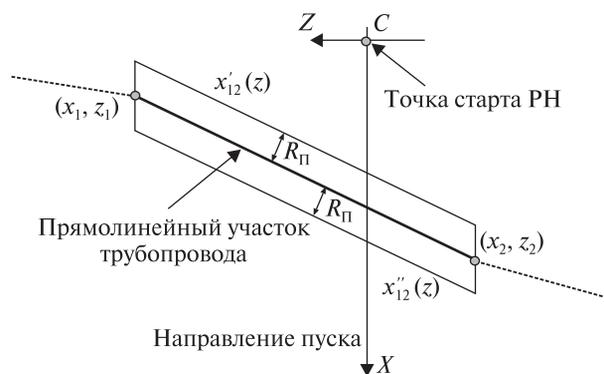


Рис. 2. К расчету зоны поражения прямолинейного участка трубопровода

чек падения аварийных РН в продольном и боковом направлениях.

В соответствии с рис. 2 выражения для  $x'_1(z)$  и  $x''_1(z)$  представляют уравнения прямых, параллельных отрезку трубопровода и отстоящие от него на расстояние  $R_{\text{п}}$ . В общем случае уравнение прямой, которая параллельна прямой, проходящей через две точки  $(x_1, z_1)$  и  $(x_2, z_2)$ , и находящейся от нее на расстоянии  $R_{\text{п}}$ , записывается следующим образом [7]:

$$x_{12}(z) = \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} (z - z_1) + x_1 \pm R_{\text{п}} \sqrt{1 + \left( \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} \right)^2},$$

где знак в выражении при  $R_{\text{п}}$  определяется тем, в какую сторону от рассматриваемого отрезка должна быть смещена параллельная прямая, и с какой стороны при этом находится начало координат (точка C на рис. 2).

Построение функций  $m_x(t)$ ,  $m_z(t)$ ,  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_z(t)$  проводится следующим образом. Для момен-

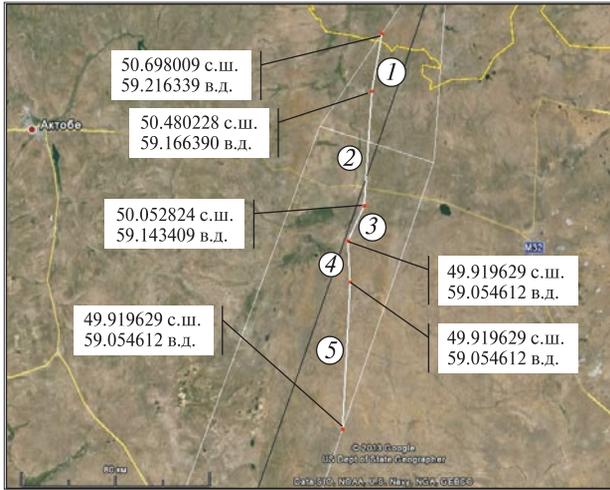


Рис. 3. Участок магистрального трубопровода «Бухара — Урал», который попадает в аварийную зону траектории пуска РН «Днепр»

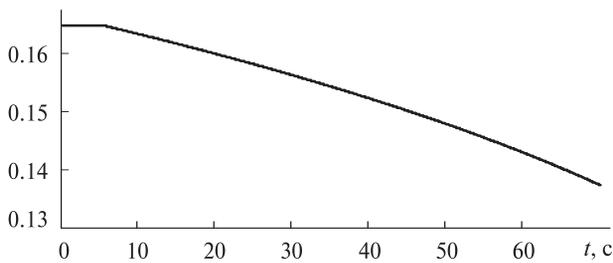


Рис. 4. Радиусы  $R_{П}$  поражения газопровода при падении и взрыве аварийной РН «Днепр»

тов времени возникновения аварийных отказов  $t_j$  ( $j = 0, \dots, N$ ), соответствующих границам интервалов времени  $\Delta t_j$ , моделируется процесс развития аварийных ситуаций и определяются точки падения аварийных РН. Последние определяются с учетом срабатывания системы безопасности полета, установленной на борту РН и ограничивающей зону разлета аварийных РН. Далее определяются числовые характеристики совокупности точек падения аварийных РН и строится аппроксимация функций  $m_X(t)$ ,  $m_Z(t)$ ,  $\sigma_X(t)$ ,  $\sigma_Z(t)$ . Например, на интервалах  $[t_{j-1}, t_j]$  последние могут быть аппроксимированы линейными законами.

В качестве примера рассмотрим оценку риска поражения для магистрального газопровода при пусках РН «Днепр». Трасса пуска РН «Днепр»

при пусках с пусковой базы Ясный в южном направлении пересекала два магистральных газопровода «Бухара — Урал» и «Средняя Азия — Центр». В случае аварии РН «Днепр» на этапе полета первой ступени возможно повреждение магистрального газопровода «Бухара — Урал», который находился в пределах расчетной зоны падения аварийной РН. Для оценки риска поражения газопровод представлялся в виде пяти отрезков. Рассматриваемые отрезки и координаты их концов показаны на рис. 3.

Вероятность аварийного отказа РН на этапе полета I ступени составляет 0.008. Для расчетов принималась модель распределения аварийных отказов РН по времени полета первой ступени, показанная на рис. 1. Время работы первой ступени РН «Днепр» составляет 97 с, при этом в случае возникновения аварии до 70 с аварийная РН будет достигать поверхности Земли без разрушения.

Характеристики рассеивания точек падения аварийной РН в зависимости от времени возникновения аварийного отказа ( $t_{АО}$ ), получен-

Таблица 1. Характеристики рассеивания точек падения аварийной РН

$t_{АО}, c$	$m_X, км$	$\sigma_X, км$	$\sigma_Z, км$
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
70	258.8	13.0	9.6

Таблица 2. Значения рисков поражения магистрального газопровода «Бухара — Урал»

Участок газопровода «Бухара — Урал» (см. рис. 3)	Длина участка, км	Риск падения аварийной РН в зону поражения газопровода
1	24.6	$1.7 \cdot 10^{-7}$
2	47.6	$4.0 \cdot 10^{-7}$
3	16.1	$6.9 \cdot 10^{-8}$
4	17.1	$4.2 \cdot 10^{-8}$
5	61.2	$3.2 \cdot 10^{-8}$
Всего	166.6	$7.2 \cdot 10^{-7}$

ные в результате проведения баллистических расчетов, приведены в табл. 1 (при этом  $m_z(t) \approx 0$ ).

В качестве поражающего фактора для газопровода рассматривалась ударная волна, которая образуется при падении и взрыве компонентов ракетного топлива аварийной РН. На рис. 4 показаны радиусы поражения как функции времени наступления аварийного отказа РН.

Расчет проведен с использованием пакета математических вычислений MathCAD. Значения рисков поражения отдельных участков магистрального газопровода «Бухара — Урал» при падении аварийной РН «Днепр», определенные в соответствии с выражениями (4) и (5), а также общий риск поражения газопровода, полученный согласно (1), приведены в табл. 2.

Полученные результаты показали, что риск поражения для магистрального газопровода «Бухара — Урал» в случае аварии РН «Днепр» находится в допустимых пределах.

## ДИСКУССИЯ

Несмотря на то что предложенная процедура требует интегрирования (проводится с использованием пакета MathCAD), она является более простой по сравнению с подходом, основанным на дискретном представлении объекта в виде точек (элементарных площадок) и требует меньшего объема исходных данных. Так, для задания зоны поражения прямолинейного участка трубопровода требуются координаты его концов и радиус поражения аварийной РН, зависящий от времени возникновения АО.

Предложенная модель также обладает достаточной общностью и может быть использована для оценки риска поражения путей железнодорожного сообщения, линий электропередач, а также речных систем. В последнем случае в расчетных формулах необходимо учитывать только ширину прямолинейных участков речной сети без учета радиуса поражения.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в статье дальнейшее развитие получили модели оценки безопасности для наземных объектов в случае аварии РН на этапе

полета. В рамках традиционных моделей предложена процедура для оценки безопасности линейного объекта (магистрального трубопровода). Модель была использована для оценки риска повреждения магистрального трубопровода «Бухара — Урал» и подтверждения безопасности при пусках РН «Днепр».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балаганский И. А., Мерзиевский Л. А. *Действие средств поражения и боеприпасов*. Новосибирск, 2004. 408 с.
2. Гладкий Э. Г. Процедура оценки полетной безопасности ракет-носителей, использующая геометрическое представление зоны поражения объекта в виде многоугольника. *Космическая техника. Ракетное вооружение*. 2015. Вып. 3. С. 50—56.
3. Гладкий Э. Г., Перлик В. И. Математические модели оценки риска для наземных объектов при пусках ракет-носителей. *Космическая техника. Ракетное вооружение*. 2010. Вып. 2. С. 3—19.
4. ДСТУ ISO 14620-1:2008. Космічні системи. Вимоги безпеки. Частина 1. Безпечність системи. Київ, 2009. 38 с.
5. Компаниец Э. П., Дронь Н. М., Белозеров В. Е. *Баллистическое обеспечение пусков ракет-носителей*. Днепропетровск, 2010. 468 с.
6. Переверзев Е. С., Даниев Ю. Ф. *Вероятностные распределения и их применение*. Днепропетровск, 2004. 418 с.
7. Привалов И. И. *Аналитическая геометрия*. Москва, 1966. 272 с.
8. *Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую природную среду*. Справочное пособие. Москва: Анкил, 2000. 638 с.
9. Easten and Western Range Safety User Requirements Manual. 1997. Vol. 1 EWR 127-1.
10. United States Code of Federal Regulations, Part 420 and Part 417 FAA.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

## REFERENCES

1. Balaganskii I. A., Merzhievskii L. A. (2004). *The impact of weapons and ammunition*. Novosibirsk: NSTU [in Russian].
2. Hladkii E. H. (2015). Assessment procedure of the flight safety for launch vehicles using the geometric representation of the damage area in the form of a polygon. *Space technology. Missile armaments*, 3, 50—56 [in Russian].
3. Hladkii E. H., Perlik V. I. (2010). Mathematical models of risk assessment for ground object during launch vehicles flights. *Space technology. Missile armaments*, 2, 3—19 [in Russian].

4. ISO 14620-1:2008. Space systems. Safety requirements. Part 1: System safety.
5. Kompaniec E. P. (2010). *Ballistic support of the launch vehicles starts*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk national university [in Russian].
6. Pereverzev Y. S., Daniev U. F. (2004). *Probability distributions and their application*. Dnepropetrovsk: Institute of Technical Mechanics NASU and SSAU [in Russian].
7. Privalov I. I. (1966). *Analytical geometry*. Moscow: Nauka [in Russian].
8. Adushkin V. V., Kozlov S. P., Petrov A. V. (Eds.). (2000). *Environmental problems and rocket & space technology exposure hazards*. Moscow: Ankil.
9. Easten and Western Range Safety User Requirements Manual. (1997). Vol. 1 EWR 127-1.
10. United States Code of Federal Regulations, Part 420 and Part 417 FAA

Received 19.03.2019

Е. Г. Гладкий

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

#### ОЦІНКА РИЗИКУ УРАЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТА У ВИПАДКУ АВАРІЇ РАКЕТИ-НОСІЯ НА ЕТАПІ ПОЛЬОТУ

У зонах падіння аварійних ракет-носіїв (РН) можуть перебувати магістральні газо- і нафтопроводи, залізничні колії, лінії електропередачі, річки тощо. Нанесення ушкоджень таким промисловим об'єктам, як газо- і нафтопроводи під час падіння аварійної РН може спричинити катастрофічні наслідки. Так, пошкодження і розрив магістрального газопроводу призведе до витoku транспортованого природного газу з подальшим потужним вибухом і сильною пожежею. У розрахунках безпеки такі об'єкти повинні розглядатися як лінійні (для них один з геометричних розмірів істотно перевищує інший), і вони є окремим випадком площинного об'єкта (традиційно безпека під час пусків РН розглядається для площинних наземних об'єктів). У статті розроблено математичну модель оцінки безпеки для магістрального трубопроводу у випадку аварії РН на етапі польоту. Для оцінки безпеки частину трубопроводу, що перебуває в зоні падіння аварійної РН, запропоновано представляти сукупністю окремих прямолінійних ділянок (відрізків). Тоді загальний ризик ураження трубопроводу дорівнює сумі ризиків ураження його окремих прямолінійних ділянок. Під ризиком ураження слід розуміти ймовірність падіння аварійної РН або її фрагментів у зоні ураження прямолінійних ділянок трубопроводу. Побудовано геометричну

модель і отримано математичні вирази для оцінки ризику ураження окремої прямолінійної ділянки трубопроводу. Як приклад використано процедуру оцінки ризику ураження для магістрального газопроводу «Бухара — Урал», розташованого у зоні падіння аварійних РН «Дніпро» і якого може бути пошкоджено у випадку аварії РН на ділянці польоту першого ступеня. Розроблена математична модель є універсальною і може використовуватися для оцінки ризику ураження інших лінійних об'єктів, що перебувають у зоні падіння аварійної РН.

**Ключові слова:** ракета-носій, політна безпека, зона падіння аварійної ракети-носія, лінійний об'єкт, ризик.

E. H. Hladkii

Yangel Pivdenne State Design Office, Dnipro, Ukraine

#### EVALUATION OF HAZARD FOR LINEAR OBJECTS IN CASE OF LAUNCH VEHICLE FAILURE IN FLIGHT PHASE

Impact areas of failed launch vehicles (LV) cover territories with gas and oil mainlines, railways, transmission facilities, rivers, etc. Damage to such industrial objects as gas and oil pipelines in case of a crash of failed LV could result in disastrous effects. For example, damage and burst of gas mainline would result in leakage of transported natural gas with a subsequent high-power explosion and heavy fire. In calculations of safety, these objects should be considered as linear (one of their geometrical dimensions essentially exceeds the other), and they represent a particular case of an areal object (traditionally, safety at LV launch is considered for areal ground objects).

The article presents the mathematical model of safety estimation for a mainline in case of LV contingency in flight. To estimate safety, the part of the pipeline within the failed LV impact area was considered as a set of individual rectilinear sections. Henceforth, a total hazard for a pipeline is obtained as the summation of risks of damage of its individual rectilinear sections. "Hazard" implies the probability of a drop of failed LV or its fragments on pipeline rectilinear section impact area. We have built the geometrical model and obtained mathematical expressions to estimate the risk of an individual pipeline rectilinear section damage. As an example, we took the procedure of the risk estimation for gas mainline "Bukhara-Ural", located within the impact area of Dnepr LV, that could be damaged in case of launch vehicle failure at the first stage of the flight phase. The mathematical model is universal and could be used to estimate the risk of damage of other linear objects within an impact area of failed launch vehicles.

**Keywords:** launch vehicle, flight safety, impact areas of failed launch vehicles, linear object, risk.