

Д-р техн. наук Е. Г. Гладкий, д-р техн. наук В. І. Перлик

РОЗВИТОК НА ДП «КБ «ПІВДЕННЕ» МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ПОЛЬотної БЕЗПЕКИ ДЛЯ ВИПАДКУ АВАРІЇ РАКЕТИ НА ЕТАПІ ПОЛЬОТУ

Убезпечення експлуатації сучасних ракетно-космічних комплексів залишається актуальною проблемою для розробників ракетно-космічної техніки. Невід'ємною складовою цієї проблеми разом із безпекою робіт під час наземної підготовки ракети-носія до пуску є забезпечення польоту. Основним завданням цієї складової безпеки ракетно-космічних комплексів є запобігання або зведення до мінімуму важких наслідків, що виникають у випадку аварії ракети-носія на етапі польоту, адже такі аварії можуть завдати збитків не тільки персоналу й об'єктам космодрому (наземного комплексу), а головне – населенню й об'єктам, які розташовані вздовж трас польоту. Показано, що забезпечення польоту ракет-носіє у своїй основі має досвід бойових ракетних систем. Під час пусків ракет-носієв безпека забезпечується за рахунок прокладення трас польоту через малонаселені (незаселені) території та застосування спеціальних бортових систем безпеки польоту. Така система обмежує розміри зони падіння аварійної ракети-носія та її фрагментів шляхом аварійного вимкнення двигуна. Останнім часом процес забезпечення польоту будується виходячи із концепції «прийнятної ризику». У її основі оцінювання ризиків для наземних об'єктів і людей, які не повинні перевищувати встановлених норм. Такий підхід вимагає створення та вдосконалення математичних моделей оцінювання ризиків у випадку аварії ракети-носія на етапі польоту. Показано шлях становлення ризик-орієнтованого підходу до забезпечення польоту на ДП «КБ «Південне». Принциповим у цьому процесі виявилось створення у структурі конструкторського бюро окремої одиниці, що почала виконувати роботу із забезпечення і аналізу польотної безпеки ракетно-космічних комплексів. Проаналізовано базову модель оцінювання ризиків ураження об'єктів і людей, що використовує максимальну зону падіння аварійної ракети-носія для випадку втрати керованості та спрацювання системи безпеки польоту. Показано основні напрями удосконалення базової моделі, які привели до створення на ДП «КБ «Південне» ряду нових, оригінальних моделей оцінювання показників польотної безпеки. Насамперед, розроблені моделі враховують особливості систем безпеки польоту, якими обладнано ракети-носії розроблення ДП «КБ «Південне»: критерії спрацювання, блокування аварійного вимкнення двигуна на початковому відрізку польоту та функціонал Fe. Крім цього, отримані моделі дозволяють урахувати різноманітний характер аварійних ситуацій, що виникають на етапі польоту ракети-носія, та можливості їх відбиття, подання зон ураження об'єктів у вигляді опуклих багатокутників, можливу фрагментацію аварійної ракети-носія на відрізку пасивного падіння та інші. Розроблені моделі широко застосовують у практиці оцінювання показників польотної безпеки у проектах ДП «КБ «Південне».

Ключові слова: ракета-носії, прийнятний ризик, аварія ракети-носія на етапі польоту, система безпеки польоту, зона падіння аварійної ракети-носія, ризик ураження наземного об'єкта, колективний ризик.

Safety of the up-to-date rocket and space complexes remains a topical problem for the developers of rocket and space technology. The integral component of this problem along with the safety of operations during launch vehicle ground pre-launch processing is organization of flight safety. The basic task of this rocket and space complexes safety component is to prevent or minimize serious consequences in case of launch vehicle failure in the flight leg, after all such accidents can cause damage to the population and facilities (including personnel and facilities of the ground complex), located along the flight paths. It is shown that the flight safety assurance of the launch vehicle is based on the experience of combat missile systems. Flight safety during the launch vehicle launches is provided by laying flight paths through sparsely populated (unpopulated) territories and using special onboard flight safety systems. This system limits the size of impact zones of emergency launch vehicle and its debris by emergency engine shutdown. Recently flight safety process is organized based on the acceptable risk concept. It is based on a risk assessment for the ground-based facilities and people, and it should not exceed the established standards. Such approach requires development and upgrading of the mathematical models of risk assessment in case of launch vehicle failure in the flight phase. Formation of the risk-oriented approach to flight safety in Yuzhnoye SDO is shown. Key moment in this process is to develop the separate structural unit, which started working on rocket and space complexes flight safety assurance and analysis. The basic model for assessing the risks of damage to facilities and people is analyzed, using the maximum impact zone of an emergency launch vehicle, which is realized in case of loss of control and flight safety system activation. The main directions of the basic model improvement are shown, which led to the development of a number of new original models of flight safety assessment in the Yuzhnoye SDO. First of all,

the developed models take into account the flight safety system specifics, which are used to equip the launch vehicles, developed by Yuzhnoye SDO: criteria of activation, blocking of the engine emergency shutdown in the initial flight phase and Fe functional. Such models allow to take into account the different nature of emergency situations in the launch vehicle flight phase and ways of their representation, representation of the damage areas of facilities in the form of convex polygons, possible fragmentation of the emergency launch vehicle at the free-fall leg etc. The developed models have found wide application in the practice of assessing flight safety indicators in the Yuzhnoye SDO projects.

Key words: launch vehicle, acceptable risk, launch vehicle failure in the flight phase, flight safety system, emergency launch vehicle impact zone, risk of damage to facilities, collection risk.

Вступ

Безпека експлуатації ракетно-космічних комплексів (РКК) була та залишається однією з найважливіших проблем у сучасній техніці. Традиційно безпеку РКК розглядають стосовно двох основних фаз (етапів) експлуатації: під час підготовки РН (РКП) до пуску (наземна експлуатація РКК) і безпосередньо польоту РН (РКП). У процесі наземної експлуатації РКК безпека, насамперед, пов'язана з обслуговувальним персоналом, а також з об'єктами та технічними системами, які забезпечують підготовку та пуск РН (РКП). При цьому можливі аварії, зазвичай, локалізовані межами наземного комплексу (НК) або космодрому. Безпеку під час наземної експлуатації РКК забезпечують шляхом розроблення безпечної технології робіт, впровадження заходів з охорони праці, використання спеціальних систем попередження та локалізації аварійних ситуацій, а також створення планів дій персоналу в разі аварії.

Аварія РН (РКП) на етапі польоту призводить до її падіння, як наслідок траси пусків і прилегли до них території є зонами потенційної небезпеки. При цьому збиток може бути завдано як об'єктам НК і персоналу, так і населенню, а також об'єктам, що не пов'язані з космічними програмами. Водночас треба зауважити, що РН (РКП) у процесі запуску КА становить небезпеку не тільки у разі аварії, але також і під час штатного польоту. В останньому випадку джерелами небезпеки є відокремлювані частини (ВЧ), що повертаються, а саме відпрацьовані ступені, стулки головного обтічника та ін. Для забезпечення їх падіння здійснюється в задалегідь виділені райони, у яких відсутні люди та не здійснюється господарська діяльність.

Нині невід'ємною частиною процесу забезпечення польоту, крім традиційного визначення зон падіння аварійних РН (РКП), є оцінювання кількісних показників безпеки –

індивідуального та колективного ризиків для людей, а також імовірності ураження різних об'єктів, що перебувають у таких зонах. Зазначені показники не повинні перевищувати певних допустимих значень. Отримання достовірних кількісних значень показників польотної безпеки РН (РКП) дозволить підвищити ефективність керування процесами убезпечення польоту. На їхній основі повинні бути сформовані обґрунтовані рекомендації, спрямовані на убезпечення об'єктів НК і персоналу, а також інших об'єктів і населення вздовж траси пуску. Зокрема, визначити зони безпечної розміщення об'єктів НК, зони евакуації населення та суден, а якщо є потреба, зони відчуження.

1. Еволюція стратегії убезпечення польоту РКК

Основу польотної безпеки сучасних РКК становить досвід бойових ракетних систем. Їх створення, яке передбачало проведення випробувальних стрільб (пусків), завжди супроводжували питання убезпечення. Безпеку для невеликих відстаней стрільби ракетних систем забезпечували, насамперед, проведенням випробувань на спеціальних полігонах, де були відсутні люди й об'єкти, яким могло бути завдано шкоди. Навіть зараз для розроблюваних некерованих ракетних систем невеликої дальності визначають зони можливого падіння аварійних ракет (реактивних снарядів) з метою оцінювання невиходу їх за межі можливих полігонів. Зі збільшенням дальності польоту бойових ракет (тактичних, оперативно-тактичних і, особливо, балістичних (БР)) можливості полігонів обмежені. Для убезпечення під час відпрацьовування таких ракет у колишньому СРСР траси польоту прокладали через незаселені (малозаселені) території, а для відпрацьованих ступенів багатоступеневих БР знадобилося виділення спеціальних

районів падіння. Таким чином, процес убезпечення під час пусків БР, а у подальшому і РН (РКП) ґрунтувався на визначенні можливих зон падіння відокремлюваних частин (ВЧ) і аварійних ракет і виключенні перебування в цих зонах можливого ураження людей і об'єктів, зокрема і шляхом організації зон відчуження. Для обмеження зони можливого падіння аварійних БР уздовж траси польоту (а також з метою приховування характеристик БР у разі аварії) керовані балістичні ракети було обладнано системами самоліквідації (системами аварійного підриву ракети), а також системами аварійного вимкнення двигуна. Останній підхід у подальшому було використано і для убезпечення польоту РН (РКП) безпілотних КА, тим більше, що значна кількість РН (РКП) мали у своїй основі бойовий аналог.

У цілому подібна стратегія забезпечення польотної безпеки повною мірою відповідає концепції «абсолютної безпеки», що була характерною в 60–70 роки для небезпечних технічних систем і виробництв.

Необхідно також відзначити, що після кожного пуску БР або РН (РКП) було виконано великий обсяг роботи щодо аналізу безпеки та підтвердження правильності прийнятих технічних рішень. Для кожного успішного пуску РН (РКП) визначали та документували характеристики та точки падіння виявлених фрагментів ВЧ, аналізували їх влучення у визначені райони. Для аварійних пусків розслідували причини аварій і впроваджували комплекс заходів, спрямованих на виключення появи надалі відмови, що призведе до аварії РН (РКП), а також визначали точки падіння фрагментів аварійної РН (РКП) та оцінювали їх характеристики.

У 80-ті роки минулого століття розробники РКТ розуміють, що розміри виділених районів для падіння ВЧ, які вважалися небезпечними, є досить значними і при цьому їх не використовують у народному господарстві. Ураховуючи це, було зроблено спробу переходу до концепції «прийнятного ризику», яку на той час почали широко застосовувати в атомній енергетиці та хімічній промисловості. Її суть [17] полягала в тому, що розробнику необхідно прагнути досягнення такого рівня ризику від небезпечних факторів, породжуваних самою технічною системою та процесом її експлуатації, який

можна розглядати як прийнятний. Таким чином, розміри зон небезпеки та відчуження необхідно визначати допустимим рівнем ризику.

Піонером використання концепції «прийнятного ризику» в РКТ колишнього СРСР слід вважати д. т. н. Я. Т. Шатрова, який створив у ЦНДІмаші школу безпеки. У своїй кандидатській дисертації [18] на початку 80-х років минулого століття він зазначав, що в ракетній техніці не знайшла належного поширення концепція «прийнятного ризику». Уперше її застосували для порівняльного аналізу розмірів наявних зон відчуження для РН «Союз» і «Протон» у районах падіння ВЧ і вздовж трас виведення з метою їх зменшення та використання частини цих територій у народному господарстві. Такий підхід вимагав впровадження у практику проектування РН (РКП) показників польотної безпеки у вигляді ризиків ураження людей і наземних об'єктів, а разом з цим задання й обґрунтування допустимого рівня ризику, розроблення інженерних методик розрахунку ризиків та ін. Під керівництвом Я. Т. Шатрова вперше було розроблено основні положення щодо кількісного оцінювання ризику ураження наземних об'єктів під час пусків РН (РКП) як у разі штатного польоту, так і у випадку аварії [13]. З їх допомогою було створено практичні процедури вибору трас пусків і районів падіння ВЧ з використанням критерію «прийнятного ризику». Розроблені в ЦНДІмаші основні положення щодо оцінювання польотної безпеки згодом становили основу методики розрахунку показників польотної безпеки [9], яку використовують для оцінювання показників польотної безпеки експлуатованих РН сімейства «Союз», «Протон» і «Ангара».

2. Досвід оцінювання польотної безпеки на ДП «КБ «Південне» у випадку аварії РН (РКП) на етапі польоту

На ДП «КБ «Південне» роботи з кількісного оцінювання ризиків ураження наземних об'єктів і людей, розташованих уздовж траси польоту РН (РКП), почалися наприкінці 80-х – у першій половині 90-х років минулого століття. До цього часу питання польотної безпеки під час пусків РН (РКП) обмежувалися виключно визначенням зон можливого

падіння аварійних РН (РКП). Зазначені роботи були ініційовані можливістю використання РН «Зеніт-2» для комерційних пусків з іноземними компаніями. Розроблені в ЦНДІмаші методичні положення щодо оцінювання ризиків і використання критерію «прийняттого ризику» було застосовано в процесі вибору трас пусків і розрахунку польотної безпеки РН «Зеніт-2». У підсумку в документах, які розробляв ЦНДІмаш, було показано, що прийняття певного рівня ризику для людей дозволяє зменшити райони відчуження.

Безпосередньо на ДП «КБ «Південне» перші самостійні напрацювання з оцінювання показників безпеки у вигляді ризиків ураження людей (індивідуальних ризиків) і об'єктів НК було зроблено в рамках проекту створення КРК «Циклон-4» з італійською фірмою FiatAvio, а пізніше і в рамках цього ж проекту із Бразилією. Для проведення такого аналізу використовували методичні підходи, розроблені в ЦНДІмаші. Водночас такі підходи було використано під час розроблення проекту КРК «Циклон-2К».

У 2007 році під час реорганізації відділу надійності в його структурі було сформовано окремий сектор, який безпосередньо відповідав за розрахунки та дослідження польотної безпеки РН (РКП) і бойових ракет. Його очолив запрошений із Дніпропетровського національного університету к. т. н. Е. Г. Гладкий. У секторі почалося системне вивчення проблеми польотної безпеки та були розроблені основні математичні моделі, які використовують для оцінювання показників польотної безпеки у випадку аварій РН (РКП). Такі моделі, насамперед, дозволяють урахувати особливості функціонування СБП, якими оснащені РН (РКП) розроблення ДП «КБ «Південне».

3. Системи безпеки польоту, які використовують у РН (РКП) розроблення ДП «КБ «Південне»

Ураховуючи те, що РН (РКП) у процесі польоту є системами підвищеної небезпеки їх обладнують спеціальними системами безпеки польоту (СБП). На РН (РКП), розроблених на ДП «КБ «Південне», зазвичай використовують інтегровані в систему керування автоматичні СБП, функції яких

обмежено локалізацією можливих наслідків аварій. У разі виявлення на етапі польоту аварійної ситуації (АС) СБП забезпечує припинення польоту шляхом аварійного вимкнення двигуна (АВД), що приводить до обмеження районів можливого падіння аварійних РН (РКП) та її фрагментів.

Для виявлення АС на етапі польоту РН (РКП) здійснюється контроль ряду функціональних параметрів. У разі виходу їхніх значень за допустимі межі СБП формує команду «Аварія» та відпрацьовуються аварійні циклограми для реалізації АВД. Стан РН (РКП) розроблення ДП «КБ «Південне» контролюється за двома основними функціональними параметрами:

- втратою керованості (втратою сталості руху) РН (РКП);
- відмовою БЦОМ.

Контроль втрати керованості відбувається шляхом аналізу кутових непогоджень у каналах тангажа, ристання або крену, які не повинні перевищувати гранично-допустимі значення. Останні, зазвичай, обираються виходячи з ефективності роботи керувальних органів і міцності конструкції РН (РКП). Контроль функціонування БЦОМ виконується за алгоритмами самоперевірки. Останнім часом до зазначених вище двох функціональних параметрів додано контроль стану (відмови) БІНС – елементів, які забезпечують отримання даних щодо параметрів польоту РН (РКП).

Крім того, на РН (РКП) розроблення ДП «КБ «Південне» в алгоритмах роботи СБП закладено спробу відбивання АС, пов'язаних із втратою керованості. На борту експлуатованих РН «Зеніт-2», РКП «Зеніт-3SL» і «Зеніт-3SLB», а також РКП, які розробляють, наприклад «Циклон-4М», передбачено контроль так званого функціонала Fe. Виявляється, що ближче до кінця роботи кожного ступеня отримані параметри руху (визначають функціонал Fe) дозволяють розв'язати задачу виведення КА на орбіту за рахунок енергетичних можливостей верхніх ступенів. Таким чином, після набору РН (РКП) функціонала Fe у разі фіксації втрати керованості замість АВД здійснюється спроба відокремлення та запуску верхнього ступеня.

Ще однією особливістю СБП, якими обладнано РН (РКП) розроблення ДП «КБ «Південне», є використання блокування АВД на

початковому відрізку польоту. Зменшення зони можливого падіння аварійної РН (РКП) за рахунок АВД, що реалізує СБП, у разі аварії на початковому відрізку польоту першого ступеня, сприяє підвищенню ризику ураження стартового комплексу (СК). У той же час блокування у межах певного інтервалу часу дозволяє затримати АВД і, таким чином, дозволяє аварійній РН (РКП) віддалитися від СК, підвищуючи його збережаність.

4. Традиційні моделі оцінювання показників польотної безпеки

Традиційні математичні моделі й методики дозволяють визначати ризики ураження наземних об'єктів і людей стосовно етапу польоту кожного ступеня. Для цього час роботи ступеня РН (РКП) поділяють на інтервали, у межах яких можлива поява аварійної відмови (АВ), що призводить до аварійного припинення польоту. Межі часових інтервалів зазвичай відповідають певним характерним подіям відповідно до циклограми роботи ступеня РН (РКП): форсування/дроселювання двигуна, вимкнення двигуна тощо. Для кінців зазначених інтервалів з використанням методу Монте-Карло (статистичного моделювання) моделювали процес розвитку АС, пов'язаної із втратою керованості (призводить до максимальних розмірів зон падіння аварійних РН (РКП)), і подальшого пасивного руху аварійної РН (РКП) після АВД, включно з її руйнуванням під час падіння. У результаті визначають характеристики розсіювання точок падіння аварійної РН (РКП) та її фрагментів і у підсумку – ризики ураження наземних об'єктів і людей.

Вихідною моделлю, з використанням якої оцінювали ризик ураження наземних об'єктів і людей у разі виникнення аварії РН (РКП), слід вважати таке співвідношення

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

де Q – імовірність виникнення АВ на відрізку польоту ступеня РН (РКП), який розглядають; $N_{\Delta t}$ – кількість інтервалів розбиття часу польоту ступеня; $P_{\Delta t j}$ – імовірність виникнення АВ ступеня РН (РКП) у j -тому ін-

тервалі часу (визначають з використанням статистичних даних про відмови або беруть рівномірним); $\Delta R_{з\text{во}j}$ – імовірність потрапляння аварійної РН (РКП) або її фрагментів у зону ураження об'єкта (ЗУО) або людини у випадку виникнення АВ у j -тому інтервалі часу. Як ЗУО вважаємо область навколо наземного об'єкта (включно із самим об'єктом), влучення в яку аварійної РН (РКП) або її фрагментів призводить до його ураження. ЗУО утворюється додаванням до контуру зони об'єкта так званої буферної зони, розмір якої відповідає радіусу ураження при падінні аварійної РН (РКП). У певних випадках ЗУО може визначатися контурами самого об'єкта, наприклад для об'єктів гідросфери, таких як озера та ін. Умовні ймовірності $\Delta R_{з\text{во}j}$ визначали виходячи з розмірів зон можливого падіння аварійних РН (РКП), які відповідають межах часових інтервалів, і при цьому зони об'єктів зображували у вигляді прямокутників, сторони яких були ортогональними головним осям розсіювання. Для людей, яких розглядали як точкові об'єкти, зона ураження являла собою коло, радіус якого відповідав радіусу ураження внаслідок ударної хвилі, термічного або токсичного (для висококиплячих палив) впливу. Розрахункову модель (1), наприклад, використовували на ДП «КБ «Південне» для оцінювання безпеки під час пусків РН «Дніпро» [5], КРК «Наземний старт» [16].

5. Моделі оцінювання польотної безпеки у разі аварії РН (РКП), які розроблені та які використовують на ДП «КБ «Південне»

5.1. Урахування в моделях оцінювання ризику ураження людей і наземних об'єктів характеру аварійних ситуацій, що виникають у польоті та реакції на них СБП

У традиційній моделі (1) диференціювання АВ у польоті не розглядають – адже розрахунки виконують для граничного випадку втрати керованості РН (РКП). У той же час для АВ, пов'язаних із втратою керованості, час розвитку АС від моменту виникнення відмови до реалізації АВД має випадковий характер, а сам процес може не завжди призводити до АВД (див. рис. 1).

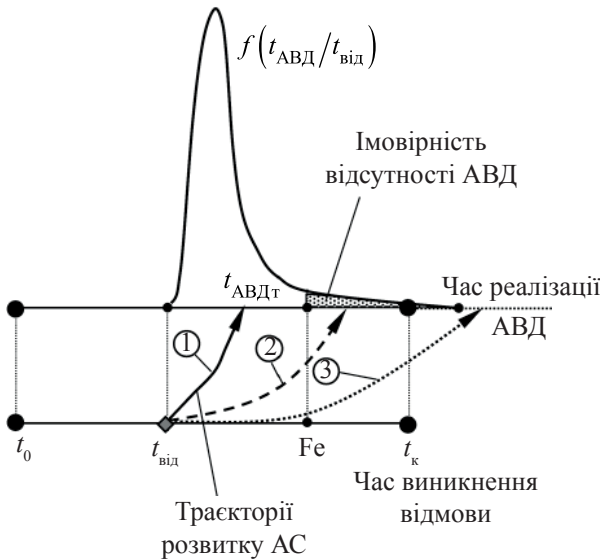


Рис. 1. Процес розвитку АС, зумовлених відмовами другої групи:

- 1 – АС, що призводять до АВД; 2 – АС, для яких вихід контрольованих параметрів за допустимі межі станеться після набору функціонала Fe (АВД не відбувається); 3 – АС, для яких вихід контрольованих параметрів за допустимі межі протягом часу роботи ступеня не станеться

Крім того, СБП не на всі АВ може (встигає) відреагувати. Ураховуючи це, відмови РН (РКП), з точки зору подальшого розвитку АС і можливих наслідків, а також реакції на них, СБП було запропоновано умовно поділяти на дві групи [7]. Першу групу становлять відмови, виникнення яких практично миттєво призводить до припинення нормального польоту – зникнення тяги та падіння аварійної РН (РКП). До другої групи належать відмови систем РН (РКП), виникнення яких призводить до втрати керуваності та відхилення РН (РКП) від штатної траєкторії виведення КА. Можливість тривалого розвитку таких АС може призвести до падіння аварійної РН (РКП) або її фрагментів на значній відстані від штатної траси польоту, а отже, розширюється зона можливого ураження. Застосування спеціальної СБП, що реалізує АВД, в цьому випадку, передусім, і дозволяє звужити зону падіння аварійних РН (РКП).

Ураховуючи поділ відмов, що призводять до аварійного припинення польоту, на дві групи, ризик ураження наземного об’єкта (людини) аварійною РН (РКП) визначають таким чином

$$R = R_1 + R_2 = \sum_{i=1}^{N_{Q_1}} R_1^{(i)} + \sum_{i=1}^{N_{Q_2}} R_2^{(i)}, \quad (2)$$

де R_1 і R_2 – відповідно ризики ураження наземного об’єкта (людини), зумовлені виникненням на борту РН (РКП) відмов першої та другої груп; N_{Q_1} , N_{Q_2} – загальна кількість відмов першої та другої груп, що розглядають; $R_1^{(i)}$, $R_2^{(i)}$ – ризики ураження об’єкта в разі виникнення АВ i -того типу, що належать до першої або другої групи відповідно.

Для визначення $R_1^{(i)}$ і $R_2^{(i)}$ почали використовувати безперервний підхід, оскільки зона падіння аварійної РН (РКП) змінюється (розширюється) протягом часу польоту. Загальне співвідношення для $R_1^{(i)}$ має вигляд

$$R_1^{(i)} = Q_1^{(i)} \sum_{j=1}^{N_{M_i}} P_{\Delta t_j}^{(i)} \frac{1}{\Delta t_j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R^{(i)}(t) dt = Q_1^{(i)} \sum_{j=1}^{N_{M_i}} P_{\Delta t_j}^{(i)} \Delta R^{(i)}(\Delta t), \quad (3)$$

де $Q_1^{(i)}$ – імовірність виникнення i -тої відмови першої групи; $P_{\Delta t_j}^{(i)}$ – імовірність виникнення i -тої відмови першої групи в j -тому інтервалі часу ($\sum_{j=1}^{N_{M_i}} P_{\Delta t_j}^{(i)} = 1$); $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ ($t_0 = 0$; $t_{N_{M_i}} = t_k$ – загальний час роботи ступеня); $\Delta R^{(i)}(\Delta t)$ – імовірність влучення аварійної РН (РКП) у ЗУО в разі виникнення АВ в інтервалі часу $[t_{j-1}, t_j]$. У випадку, коли для опису точок падіння аварійних РН (РКП) використовували нормальні закони, маємо

$$\Delta R^{(i)}(\Delta t_j) = \frac{1}{\Delta t_j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \left[\iint_{S_{ЗУО}} N(x; m_x(t), \sigma_x(t)) \times \right. \\ \left. \times N(z; m_z(t), \sigma_z(t)) dx dz \right] dt, \quad (4)$$

де $N(\bullet)$ – густина нормального розподілу; $m_x(t)$, $m_z(t)$, $\sigma_x(t)$, $\sigma_z(t)$ – відповідно центри розсіювання та середні квадратичні відхилення розкиду точок падіння аварійних РН (РКП) у поздовжньому та бічному напрямках для моменту часу виникнення АВ t . Якщо ЗУО подано у вигляді типового прямокутника, сторони якого паралельні головним осям розсіювання, то для $\Delta R^{(i)}(\Delta t)$ маємо

$$\Delta R^{(i)}(\Delta t_j) = \frac{1}{\Delta t_j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \left[\Phi \left(\frac{L_1 - m_X(t)}{\sigma_X(t)} \right) - \Phi \left(\frac{L_0 - m_X(t)}{\sigma_X(t)} \right) \right] \times \left[\Phi \left(\frac{Z_1 - m_Z(t)}{\sigma_Z(t)} \right) - \Phi \left(\frac{Z_0 - m_Z(t)}{\sigma_Z(t)} \right) \right] dt, \quad (5)$$

де L_0, L_1 – відстані вздовж траси польоту від точки старту РН (РКП) до ближньої та дальньої сторін прямокутника; Z_0, Z_1 – відстані від траси до ближньої та дальньої сторін прямокутника у бічному напрямку; $\Phi(\bullet)$ – функція Лапласа.

Для визначення складової $R_2^{(i)}$ кожному моменту часу виникнення відмови РН (РКП) t було поставлено у відповідність математичне сподівання випадкового значення часу реалізації $t_{\text{АВД}} - \bar{t}_{\text{АВД}}$. Таким чином, момент відмови та характеристики розсіювання точок падіння аварійних РН (РКП) після АВД поєднуються з використанням такого логічного ланцюжка (рис. 2).

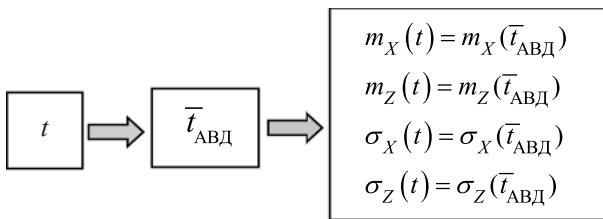


Рис. 2. Зв'язок між часом виникнення відмови другої групи та характеристиками розсіювання точок падіння аварійних РН (РКП) після АВД

Крім того, для $R_2^{(i)}$ було враховано, що відмова другої групи, яка виникла, не завжди призводить до втрати керованості і, як наслідок, реалізації АВД до набору функціонала Fe . У підсумку для $R_2^{(i)}$ було отримано вираз

$$R_2^{(i)} = Q_2^{(i)} \sum_{j=1}^{N_{\Delta t_j}} P_{\Delta t_j}^{(i)} \cdot P_{\text{АВД}_j}^{(i)} \cdot \Delta R^{(i)}(\Delta t_j), \quad (6)$$

де $Q_2^{(i)}$ – імовірність виникнення i -тої відмови другої групи; $P_{\Delta t_j}^{(i)}$ – імовірність виникнення i -тої відмови другої групи в j -тому інтервалі часу; $P_{\text{АВД}_j}^{(i)}$ – імовірність того, що i -та відмова другої групи, яка виникла в j -тому інтервалі часу, призведе до втрати керованості та реалізації АВД до набору

функціонала Fe (визначається на основі моделювання процесу розвитку АС); $\Delta R^{(i)}(\Delta t_j)$ – імовірність влучання аварійної РН (РКП) у ЗУО в разі виникнення i -тої відмови другої групи в j -тому інтервалі часу (визначається згідно з (4) і (5)).

5.2. Урахування в моделях оцінювання польотної безпеки блокування АВД у випадку аварії РН (РКП) на початковому відрізку польоту. Задача вибору часу блокування АВД на початковому відрізку польоту РН (РКП)

Блокування АВД на початковому відрізку польоту першого ступеня (схему розвитку таких АС наведено на рис. 3) знижує ризик ураження СК за рахунок розширення зони можливого падіння аварійних РН (РКП), але в той же час зростають ризики для інших об'єктів НК, а також розширюється небезпечна зона для людей, де індивідуальні ризики перевищують допустимий рівень. Таким чином, з одного боку було потрібно оцінити ризик для об'єктів у пристартовій зоні (вдосконалити модель (2)), а з другого – виникла оптимізаційна задача вибору інтервалу часу блокування АВД на початковому відрізку польоту.

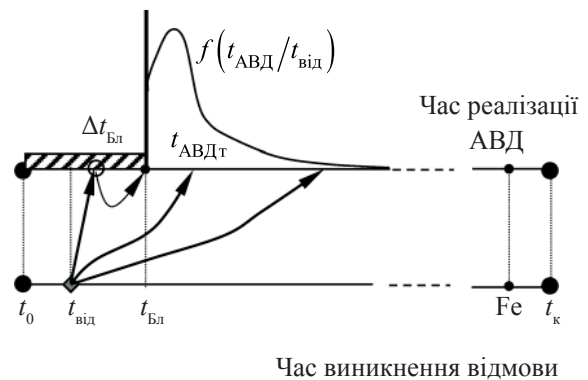


Рис. 3. Процес розвитку АС з урахуванням блокування АВД на початковому відрізку польоту

Ризик ураження об'єкта (людини), що знаходиться у пристартовій зоні, з урахуванням блокування АВД на початковому відрізку польоту, було запропоновано визначати таким чином [6, 7, 20]:

$$R = R_1 + R'_2 + R''_2, \quad (7)$$

де R'_2 – ризик, зумовлений виникненням на борту РН (РКП) відмов, що призводять до втрати керованості РН (РКП) в інтервалі часу $[0, t_{\text{Бл}}]$ і, відповідно, до реалізації АВД в момент скасування блокування $t_{\text{Бл}}$ (див. рис. 3); R''_2 – ризик, зумовлений виникненням на борту РН (РКП) відмов, що призводять до втрати керованості та реалізації АВД після скасування блокування АВД, зокрема і з урахуванням відмов, що виникли в інтервалі $[0, t_{\text{Бл}}]$, які призводять до реалізації АВД після скасування блокування.

Побудова виразів для складових R'_2 та R''_2 у методичному плані не відрізняється від способу отримання R_2 . У цьому випадку моментам відмов t_j відповідають такі часові проміжки виходу на АВД: для R'_2 – інтервал від t_j до моменту скасування блокування АВД $t_{\text{Бл}}$; для R''_2 – середній час розвитку АС до реалізації АВД ($\bar{t}_{\text{АВД}_j}$), який розраховують виключно для моментів часу реалізації АВД, які перевищують $t_{\text{Бл}}$.

Співвідношення (7) дозволяє визначити ризики ураження об'єктів НК, а також небезпечні зони для людей і сформулювати задачу вибору інтервалу часу блокування АВД на початковому відрізку польоту першого ступеня. Математично ця задача формулюється так [6, 20]:

$$R(S_{\text{СК}}/\Delta t_{\text{Бл}}) \rightarrow \min; \quad (8)$$

$$R(S_{\text{НК}_i}/\Delta t_{\text{Бл}}) \leq R_* \text{ для } i = \overline{1, N_{\text{НК}}}; \quad (9)$$

$$S_{\text{НЗ}}^{(\text{люод})}(R_{\text{Доп}}/\Delta t_{\text{Бл}}) \leq S_{\text{Доп}}, \quad (10)$$

де $R(\bullet/\Delta t_{\text{Бл}})$ – ризик ураження об'єкта НК за умови, що інтервал часу блокування АВД на початковому відрізку польоту становить $\Delta t_{\text{Бл}}$; $S_{\text{СК}}$, $S_{\text{НК}_i}$ – зони ураження СК та інших об'єктів НК відповідно; $N_{\text{НК}}$ – кількість розглянутих об'єктів НК, виключаючи СК; R_* – допустимий ризик ураження об'єктів НК; $S_{\text{НЗ}}^{(\text{люод})}(R_{\text{Доп}}/\Delta t_{\text{Бл}})$ – небезпечна зона для людей, де індивідуальні ризики перевищують допустимий рівень $R_{\text{Доп}}$ за умови, що час блокування АВД становить $\Delta t_{\text{Бл}}$; $S_{\text{Доп}}$ – область, у межах якої дозволено перевищення допустимого рівня ризику для людей (зона,

де під час пуску РН (РКП) гарантовано буде відсутнє населення).

Отже, необхідно визначити інтервал часу блокування АВД, який одночасно дозволить знизити рівень ризику для СК і не перевищити допустимий ризик ураження для інших об'єктів НК, а розширення небезпечної зони для людей не повинно перевищувати певні граничні межі, наприклад, межі космодрому. В іншому випадку навколо космодрому необхідна організація зон відчуження або евакуація населення на час проведення пуску РН (РКП).

Шляхом розв'язання оптимізаційної задачі (8)–(10) було визначено тривалість блокування АВД на початковому відрізку польоту для створюваної РКП «Циклон-4» (див. табл. 1) під час пусків з космодрому Алькантара (Бразилія) [14, 20]. Правилами космодрому було визначено допустимі рівні ризику R_* і $R_{\text{Доп}}$. Виходячи з розрахунків, з усіх об'єктів НК КРК «Циклон-4» у разі збільшення часу блокування АВД $\Delta t_{\text{Бл}}$ найшвидше збільшувався ризик для технічного комплексу (ТК), який мав значну площу та розташовувався найближче до СК. Для нього допустиме значення ризику становило $R_* = 3 \cdot 10^{-5}$ (розміщення людей на ТК під час пуску РКП не передбачалося). Для інших об'єктів НК КРК «Циклон-4», де, зокрема, під час пуску РКП мав би перебувати персонал, було отримано ризики, значно нижчі допустимого рівня (10^{-6}).

Таблиця 1

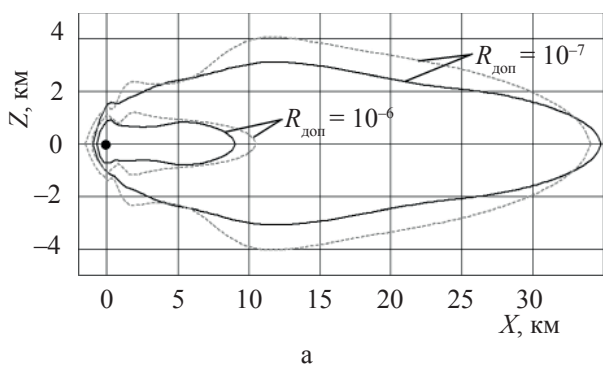
Ризики ураження для СК і ТК та радіуси небезпечної зони для людей під час пуску РКП «Циклон-4»

$\Delta t_{\text{Бл}}, \text{ с}$	Ризики для СК і ТК		Радіус небезпечної зони для людей $R_{\text{НЗ}}^{(\text{люод})}, \text{ км}$
	$R_{\text{СК}}$	$R_{\text{ТК}}$	
12	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-6}$	0,8
15	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$4,43 \cdot 10^{-6}$	1,4
18	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	1,9
25	$7,40 \cdot 10^{-4}$	$3,05 \cdot 10^{-5}$	2,8

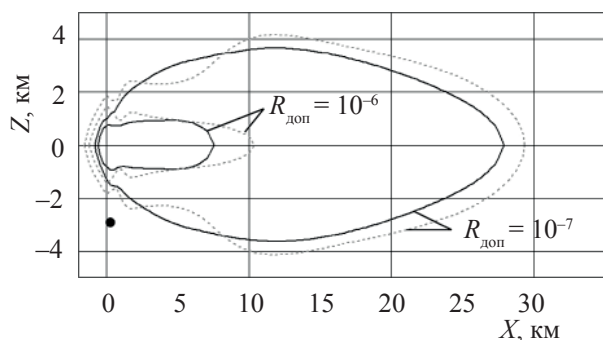
Виходячи виключно із допустимого рівня ризику для об'єктів НК, тривалість блокування АВД могла становити до 25 с. Проте для виключення потрапляння в небезпечну

зону прилеглих до космодрому поселень (найближче було розташоване на відстані $\approx 1,5$ км від точки старту РКП) інтервал блокування АВД на початковому відрізку польоту для РКП «Циклон-4» повинен був не перевищувати 15 с. Останнє значення було використано в циклограмі роботи системи керування РКП, яка мала реалізувати алгоритм СБП.

Окремо треба зауважити, що побудова небезпечних зон для населення з використанням (7) дозволила сформулювати практичні заходи щодо убезпечення людей під час пусків РКП «Циклон-4». Так було проведено зміну азимута для початкового відрізку польоту РКП на сонячно-синхронну орбіту з метою унеможливлення потрапляння в отриману небезпечну зону невеликих селищ на території Бразилії [14, 15]. Отримані небезпечні зони для персоналу (допустимий рівень індивідуального ризику $R_{\text{доп}} = 10^{-6}$) і населення (допустимий рівень ризику $R_{\text{доп}} = 10^{-7}$) для двох можливих орбіт виведення КА показано на рис. 4 (пунктиром показано зону, отриману традиційним способом, коли не враховували класифікацію відмов).



а



б

Рис. 4. Небезпечні зони для людей під час пуску РКП «Циклон-4»:

а – траса виведення КА на сонячно-синхронну орбіту;
б – траса виведення КА на екваторіальну орбіту

5.3. Зображення зон ураження наземних площинних об'єктів з використанням опуклих багатокутників

Принциповим для оцінювання показників безпеки розташованих у зонах падіння аварійної РН (РКП) площинних об'єктів (населених пунктів, об'єктів промисловості, включно з об'єктами НК, природних об'єктів тощо) є математичний опис зон їх ураження. Від коректності такого опису істотно залежить точність отримання умовної ймовірності $\Delta R^{(i)}(\Delta t_i)$ у (4) і у підсумку показників польотної безпеки.

Для зображення ЗУО традиційно використовують типові фігури – прямокутники або кола (див., наприклад, [19]). Так, спосіб приведення ЗУО до ортогонального рівновеликого прямокутника є досить універсальним, і дозволяє відносно просто (див. (5)) отримати кінцеві математичні співвідношення. У той же час зображення у вигляді прямокутника або кола об'єктів складної конфігурації, що мають значні розміри, вочевидь, призведе до великої похибки в процесі визначення ризику їх ураження. З цією метою ЗУО було запропоновано подавати у вигляді іншої більш універсальної фігури – опуклого багатокутника [4]. Це зумовлено тим, що зону будь-якого площинного об'єкта, а відповідно і ЗУО, найкращим чином можна представити у вигляді багатокутника або сукупності опуклих багатокутників (див. рис. 5 і 6).



Рис. 5. Зображення у вигляді багатокутника населеного пункту, який знаходиться у зоні падіння аварійної РН «Дніпро»

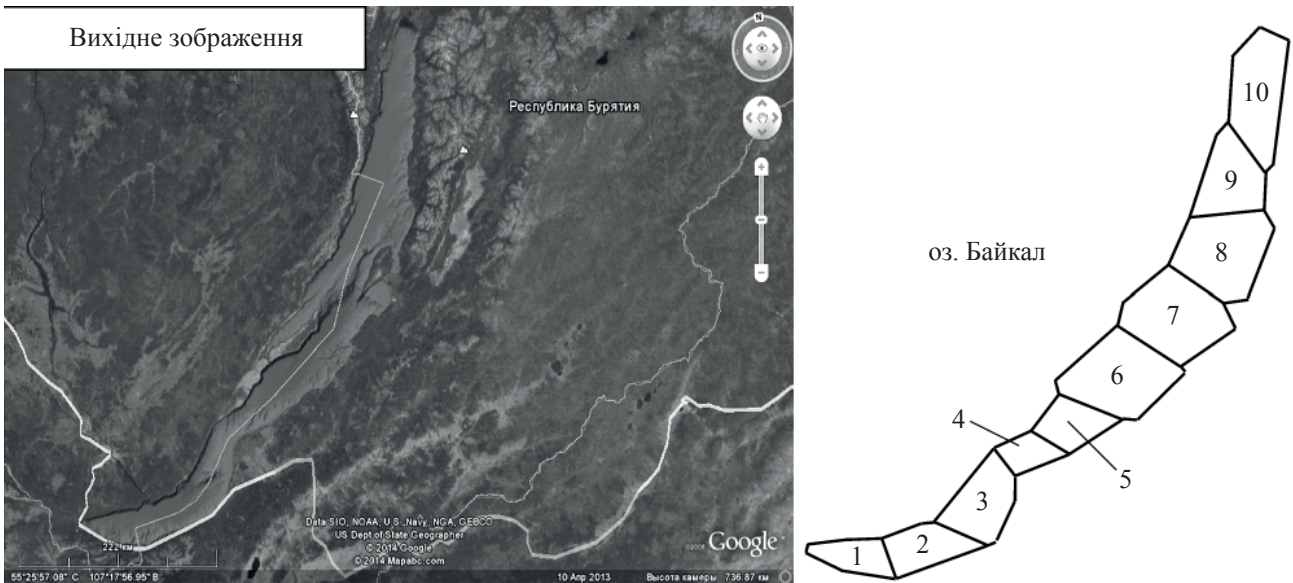


Рис. 6. Зображення оз. Байкал, яке потрапляє в зону падіння аварійної РКП «Зеніт-3SLБ», у вигляді сукупності опуклих багатокутників

Координати вершин багатокутника зони об'єкта можливого ураження на поверхні Землі задають у вигляді широти та довготи (φ, λ) з використанням електронних атласів, наприклад атласу Google Earth, і далі у стартовій системі координат. ЗУО отримуємо додаючи до зони об'єкта радіуса ураження (рис. 7). Для оцінювання ризику опуклий багатокутник, що описує ЗУО, розбивають на трикутники (рис. 7). Тоді сумарний ризик для об'єкта може бути записаний як

$$R_o = \sum_{N_{\Delta}} R_{\Delta_i}, \quad (11)$$

де N_{Δ} – кількість трикутників, що складають багатокутник ЗУО ($N_{\Delta} = N_o - 2$); R_{Δ_i} – імовірність влучення аварійної РН (РКП) у i -тий трикутник. Задача оцінювання ризику

ураження об'єкта зводиться до визначення ймовірності влучення аварійної РН (РКП) в область, що обмежена кожним трикутником [4]. Таким чином, з точки зору оцінювання безпеки трикутник може розглядатися як найбільш універсальна елементарна фігура для зображення зон ураження наземних об'єктів.

Зазначений спосіб зображення ЗУО, наприклад, було використано для визначення ймовірності падіння фрагментів аварійної РКП «Зеніт-3SLБ» з КА «Либідь» (у разі аварії на етапі польоту другого ступеня) на воді оз. Байкал (див. рис. 6) та ймовірностей падіння аварійної РКП «Циклон-4М» та її фрагментів у озера, розташовані у районі точки старту та вздовж траси польоту на території Нової Шотландії, Канада (рис. 8).

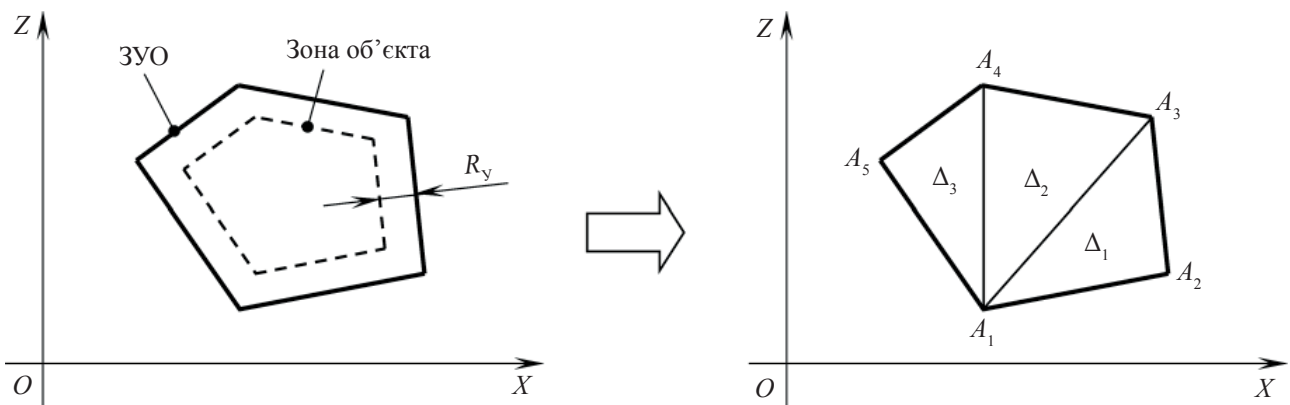


Рис. 7. Геометричне зображення наземного площинного об'єкта для оцінювання ризику його ураження

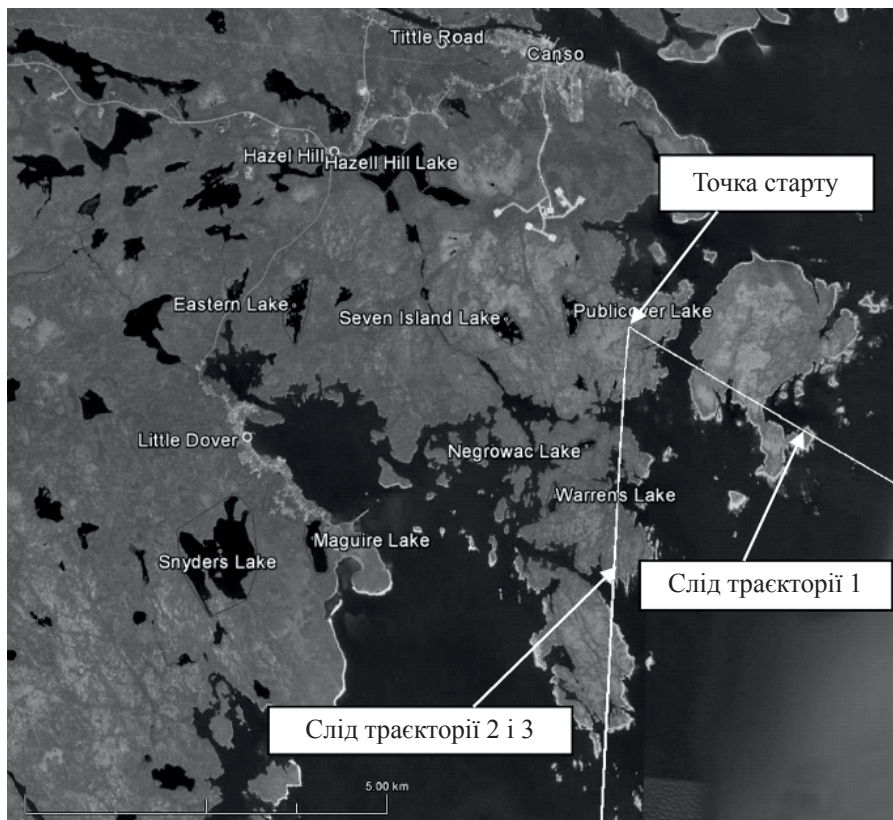


Рис. 8. Озера на території провінції Нова Шотландія (Канада), які знаходяться у зоні падіння аварійної РКП «Циклон-4М»

Для оз. Байкал було отримано ймовірність $1,5 \cdot 10^{-6}$, що за відсутності палива у фрагментах аварійної РКП «Зеніт-3SLБ», є прийнятною.

Для РКП «Циклон-4М» результати розрахунків для трьох базових траєкторій виведення КА наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Ймовірність падіння аварійної РКП «Циклон-4М» або її фрагментів на води озер у пров. Нова Шотландія, Канада

Назва озера	Траєкторія		
	Траєкторія 1	Траєкторія 2	Траєкторія 3
Publicover	$3,09 \cdot 10^{-5}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$4,09 \cdot 10^{-5}$
Seven Island	$4,21 \cdot 10^{-7}$	$5,18 \cdot 10^{-6}$	$5,20 \cdot 10^{-6}$
Hazel Hill	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$3,26 \cdot 10^{-7}$	$3,34 \cdot 10^{-7}$
Eastern	$2,15 \cdot 10^{-9}$	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$
Negrowac	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$3,93 \cdot 10^{-6}$	$4,14 \cdot 10^{-6}$
Warrens	$3,43 \cdot 10^{-7}$	$2,37 \cdot 10^{-6}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$
Maguire	$3,01 \cdot 10^{-9}$	$6,56 \cdot 10^{-7}$	$5,61 \cdot 10^{-7}$
Snyders	$2,72 \cdot 10^{-9}$	$1,98 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$

Розрахунки свідчать, що для озер, які розташовані найближче до точки старту РКП «Циклон-4М», маємо перебільшення допустимого рівня ризику.

Використання багатокутників для зображення ЗУО також дозволяє визначити ризик ураження для об'єктів, які захищені обвалуванням або спеціальними захисними перешкодами [2], що є притаманним об'єктам НК.

Зону ураження такого захищеного об'єкта зображено сукупністю опуклих багатокутників (чотирикутників), як показано на рис. 9. Висоти трапецій, побудованих на сторонах об'єкта, відповідають радіусам ураження (для захищеної сторони споруди він менший $R_y > R_{y*}$). Ризик ураження такого об'єкта визначають як

$$R_O = \sum_{N_{ок}} R_{окi}$$

де $N_{ок}$ – кількість складових багатокутників; $R_{окi}$ – ризик для кожного з багатокутників.

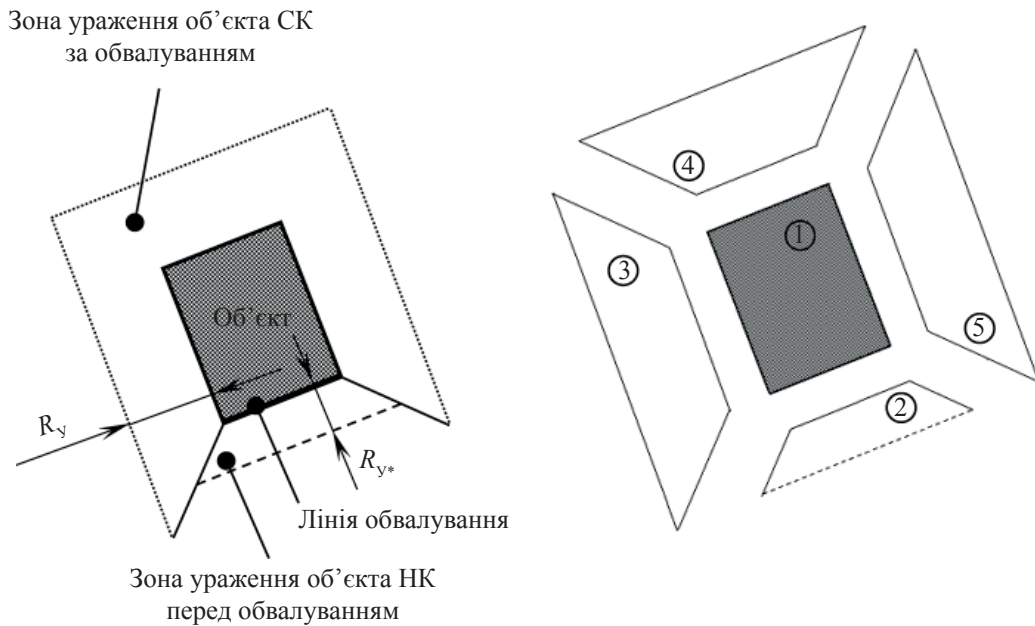


Рис. 9. Зображення зони ураження об'єкта, який захищено обвалуванням

5.4. Урахування фрагментації в моделях оцінювання ризиків ураження наземних об'єктів

Значна частина розроблених на ДП «КБ «Південне» і використовуваних на практиці моделей оцінювання польотної безпеки розглядає падіння незруйнованої РН (РКП), тобто аварію на відрізку польоту першого ступеня. Це зумовлено тим, що падіння незруйнованої аварійної РН (РКП) призводить до максимального набору уражальних факторів (ударна хвиля, тепловий і токсичний вплив) і рівнів їх впливу. У сукупності це зумовлює високі рівні ризику ураження для об'єктів і людей. У той же час, починаючи з певного моменту часу польоту, під час виникнення АВ слід очікувати руйнування РН (РКП) на відрізку пасивного падіння. Виходячи з цього, розроблені моделі отримали узагальнення на випадок фрагментації РН (РКП). Визначальним тут виявляється характер можливого руйнування аварійної РН (РКП). Найпростіше врахувати фрагментацію у випадку, коли протягом певного часу виникнення АВ вона має регулярний характер, тобто утворюється відома та незмінна кількість фрагментів. Наприклад, у разі аварії РН (РКП) на певних відрізках польоту першого ступеня фрагментація кор-

пусу аварійної РН (РКП) відбуватиметься за лініями технологічного членування. Таким чином, кількість і характеристики фрагментів відомі. У цьому випадку на інтервалах часу Δt , на яких зберігається сталість фрагментів, що досягають поверхні Землі, складову $\Delta R^{(i)}(\Delta t_j)$ у формулах (3) і (6) визначатимуть таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta R^{(i)}(\Delta t_j) &= 1 - \prod_{N_{\text{фр}}} (1 - \Delta R_{\text{фр}}^{(i)}(\Delta t_j)) \approx \\ &\approx \sum_{N_{\text{фр}}} \Delta R_{\text{фр}}^{(i)}(\Delta t_j), \end{aligned} \quad (12)$$

де $\Delta R_{\text{фр}}^{(i)}(\Delta t_j)$ – імовірність ураження об'єкта одним фрагментом аварійної РН (РКП) після виникнення відмови i -того типу в j -тому інтервалі часу; $N_{\text{фр}}$ – кількість фрагментів, що утворюються під час руйнування корпусу РН (РКП) на відрізку пасивного падіння. Імовірності можна визначити, скориставшись формулами (4), (5). При цьому для кожного фрагмента аварійної РН (РКП) буде своя ЗУО відповідно до його радіуса ураження.

Розрахункова модель значно ускладнюється, якщо маємо нерегулярну (випадкову) фрагментацію аварійної РН (РКП) на відрізку пасивного падіння щодо кількості та характеристик фрагментів, які досягають

поверхні Землі. Така фрагментація аварійної РН (РКП) на відрізку пасивного падіння характерна для аварій на етапі польоту другого та наступних ступенів. У цьому випадку для кожного моменту часу виникнення відмови першої або другої груп t_j визначають імовірності $\Delta R^{(i)}(t)$ для відповідної кількості фрагментів і будують безперервну криву (рис. 10).

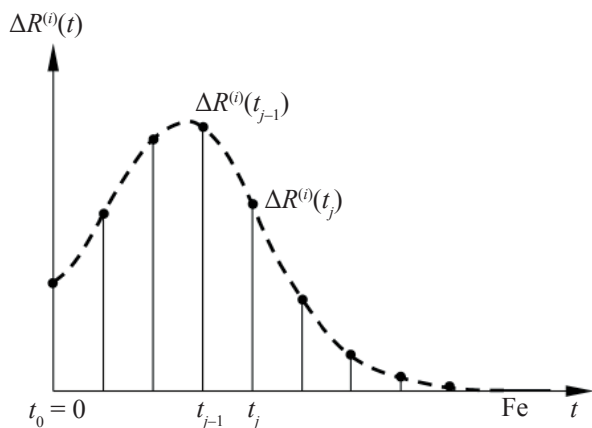


Рис. 10. Імовірність влучання фрагментів аварійної РН (РКП) у ЗУО в залежності від часу польоту ступеня (для i -того типу відмов)

Використовуючи її, визначають складові $R_1^{(i)}$ і $R_2^{(i)}$. Ризик ураження наземного об'єкта фрагментами аварійної РН (РКП) для розглянутого моменту аварійного припинення польоту може бути визначений аналогічно (12).

5.5. Удосконалення моделей оцінювання колективного ризику для населених територій, які потрапляють у зону падіння аварійних РН (РКП)

Концепцію подання ЗУО у вигляді багатокутників було використано для удосконалення процедури визначення колективного ризику в межах населених територій, які потрапляють в зону падіння аварійної РН (РКП). Традиційно для визначення колективного ризику рекомендовано [19] зону падіння аварійної РН (РКП) розбивати на елементарні сферичні квадратики (зазвичай в 1 градус за довготою та широтою). Сумарний колективний ризик визначають як

$$E_{c\Sigma} = \sum_N E_{ci}, \quad (13)$$

де E_{ci} – значення колективного ризику для елементарних квадратиків, які накривають зону падіння аварійної РН (РКП); N – сумарна кількість таких елементарних квадратиків.

У свою чергу значення колективного ризику для кожного з таких елементарних квадратиків розраховують за формулою

$$E_{ci} = \sum_{N_{\text{фр}}} \sum_{N_{\Delta t}} P_{\text{нт}} \cdot S_{\text{уп}} \cdot \lambda, \quad (14)$$

де $N_{\text{фр}}$ – кількість фрагментів аварійної РН (РКП), що досягають поверхні Землі; $N_{\Delta t}$ – кількість інтервалів розбиття часу польоту ступеня РН (РКП); $P_{\text{нт}}$ – імовірність падіння фрагмента аварійної РН (РКП) у межі розглянутого елементарного квадрата (населеної території) у разі виникнення аварії в інтервалі часу Δt ; $S_{\text{уп}}$ – площа ураження фрагментом, який досягає поверхні Землі; λ – густина населення в межах розглянутої території (дані доступні на спеціалізованих сайтах у мережі InterNet).

У роботі [1] було показано, що такому підходові притаманні певні недоліки. Зазначені елементарні квадратики мають досить великі розміри. Вони можуть перевищувати розміри зон падіння аварійних РН (РКП) після АВД, а в їх межах можуть перебувати території, густина населення яких може істотно відрізнятись, або морські території, де населення взагалі відсутнє. Відповідно було розроблено процедуру оцінювання колективного ризику тільки для територій на суходолі, які потрапляють у зону падіння аварійних РН (РКП). Такі території запропоновано розбивати на ділянки за територіальною належністю держав і далі відповідного адміністративного територіального поділу. Таким чином, сумарний колективний ризик для населених територій, які потрапляють в зону падіння аварійних РН (РКП), як і раніше, будемо визначати за формулою (13), у якій складові E_{ci} є значеннями колективного ризику для адміністративних одиниць (провінції, департаменти, області тощо) держав, які потрапляють в аварійну зону траси пуску, а N відповідно – сумарна кількість

таких адміністративних одиниць. Дані щодо кількості населення та його густини в межах розглянутих адміністративних одиниць держав можуть бути знайдені в глобальній мережі InterNet. Ураховуючи, що конфігурація адміністративних одиниць держав може бути досить складною, для отримання більш коректних оцінок колективного ризику (насамперед $P_{нт}$) адміністративні одиниці держав, які потрапляють в зону падіння аварійних РН (РКП), було запропоновано зображати у вигляді одного або декількох опуклих багатокутників [1, 12].

5.6. Визначення ризику ураження лінійних об'єктів, розташованих у зоні падіння аварійних РН (РКП)

У межах зон падіння аварійних РН (РКП) можуть перебувати лінійні об'єкти (лінійно протяжні об'єкти, у яких довжина значно перевищує ширину). До таких об'єктів, насамперед, належать магістральні газо- і нафтопроводи, які незначно заглиблені (або які прокладено на поверхні). Їх руйнування (пошкодження) може призвести до серйозних, а в окремих випадках і до катастрофічних наслідків. До подібних лінійних об'єктів також можуть бути віднесені залізниці, ЛЕП, річки.

Для оцінювання ризику ураження частину лінійного об'єкта (як такий умовний об'єкт розглянемо трубопровід) [3], яка потрапляє в аварійну зону траси пуску, зображують у вигляді сукупності окремих прямолінійних відрізків. Тоді сумарний ризик ураження трубопроводу у випадку аварії РН (РКП) має бути визначений таким чином

$$R_{тр} = \sum_{N_{тр}} R_{тр_i},$$

де $N_{тр}$ – кількість прямолінійних відрізків трубопроводу, що потрапили в аварійну зону траси пуску РН (РКП); $R_{тр_i}$ – ризик ураження i -того прямолінійного відрізка трубопроводу.

Ризик для кожного прямолінійного відрізка трубопроводу визначають за формулою

$$R_{тр_i} = Q \sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} P_{\Delta t_j} \frac{1}{\Delta t_j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R_{тр}(t) dt, \quad (15)$$

де $\Delta R_{тр}(t)$ – імовірність влучення аварійної РН (РКП) у зону ураження розглянутого прямолінійного відрізка трубопроводу (рис. 11) у випадку аварії в момент часу t .

Її визначають таким чином

$$\Delta R_{тр}(t) = \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1(z)}^{x_2(z)} f(x, z; m_x(t), m_z(t), \sigma_x(t), \sigma_z(t)) dx dz,$$

де z_1, z_2 – координати кінців відрізка трубопроводу, що розглядається; $x_1(z), x_2(z)$ – прямі, що визначають межі зони ураження відрізка трубопроводу.

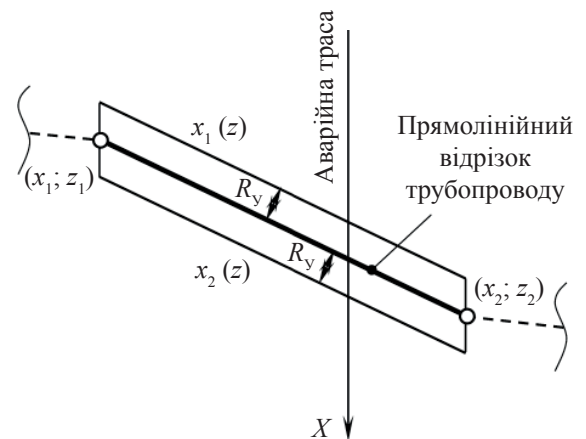


Рис. 11. Зона ураження прямолінійного відрізка трубопроводу (R_y – радіус ураження)

Формулу (15) легко узагальнити на випадок, коли окремо виділяють і розглядають відмови, що призводять до аварійного припинення польоту, зокрема й у випадку поділу їх на дві групи.

Розроблену модель, наприклад, було використано для визначення ризику ураження магістральних газогонів «Бухара–Урал» і «Середня Азія–Центр», які потрапляли у зони падіння аварійної РН «Дніпро» під час пусків з пускової бази Ясний. Зокрема, газогін «Бухара–Урал» у розрахунках було поділено на п'ять прямолінійних відрізків. Дані про зазначені відрізки та значення отриманих ризиків ураження для них під час падіння аварійної РН «Дніпро» (на відрізку пасивного падіння РН не руйнується) наведено в табл. 3.

Отже, за результатами розрахунків було показано, що ризик для магістрального газогону у випадку аварії РН «Дніпро» не перевищував допустимого рівня (10^{-6}), що виявилось прийнятним.

Таблиця 3

**Ризики ураження магістрального газогону «Бухара–Урал»
у випадку аварії РН «Дніпро»**

Відрізок	Початок (координати)	Кінець (координати)	Довжина, км	R
1	50,698009 пн.ш. 59,216339 сх.д.	50,480228 пн.ш. 59,166390 сх.д.	24,6	$1,7 \cdot 10^{-7}$
2	50,480228 пн.ш. 59,166390 сх.д.	50,052824 пн.ш. 59,143409 сх.д.	47,6	$4,0 \cdot 10^{-7}$
3	50,052824 пн.ш. 59,143409 сх.д.	49,919629 пн.ш. 59,054612 сх.д.	16,1	$6,9 \cdot 10^{-8}$
4	49,919629 пн.ш. 59,054612 сх.д.	49,765960 пн.ш. 59,075312 сх.д.	17,1	$4,2 \cdot 10^{-8}$
5	49,765960 пн.ш. 59,075312 сх.д.	49,215921 пн.ш. 59,059330 сх.д.	61,2	$3,2 \cdot 10^{-8}$
Разом			166,6	$7,2 \cdot 10^{-7}$

5.7. Моделі оцінювання ймовірності відсутності аварії на борту РН (РКП), обладнаної СБП, що виявляє та відбиває АС

Розроблені на ДП «КБ «Південне» математичні моделі оцінювання польотної безпеки дозволяють визначати ризики ураження наземних об'єктів у разі аварії РН (РКП), для якої функція СБП обмежена виключно локалізацією наслідків аварії шляхом АВД. У той же час у складі сучасних РН (РКП) можуть застосовуватися досконаліші СБП, що містять діагностичну систему та засоби запобігання для забезпечення ідентифікації виниклої АС і її відбиття з метою продовження польоту. У цьому випадку у формулах оцінювання ризику ураження наземного об'єкта (3) і (6) необхідно розглядати не просто подію виникнення АВ, а більш складну подію – аварії. Вона полягає в тому, що на борту РН (РКП) трапляється АВ, і при цьому дії з боку СБП, які спрямовані на відбиття (ліквідацію) виниклої АС, не спрацювали. У роботі [8] отримано вираз для визначення ймовірності протилежної події (\bar{D}), а саме відсутності аварії РН (РКП) з урахуванням наявних у складі СБП систем контролю (СКр) і засобів запобігання (ЗЗ) АС

$$P(\bar{D}) = P_c + \sum_{i=1}^N P(AB_j) P((CKp_j \cap Z3_j) / AB_j),$$

де P_c – ймовірність безвідмовної роботи РН (РКП) у польоті; N – кількість АВ і породжуваних ними АС, які можуть бути розпізнані та відбиті; $P(AB_j)$ – ймовірність виникнення АВ, що може бути відбита;

$P((CKp_j \cap Z3_j) / AB_j)$ – ймовірність виявлення, розпізнавання і відбиття АС з використанням СКр і ЗЗ за умови виникнення АВ.

Для оцінювання умовної ймовірності $P((CKp_j \cap Z3_j) / AB_j)$ запропоновано параметричне співвідношення, що впливає з резерву часу розвитку АС. Для цього час на виявлення, розпізнавання та відбиття АС не повинен перевищувати тривалості розвитку АС до настання аварії. Власне застосування спеціальних систем запобігання аварій зумовлено тим, що з моменту виникнення АВ до настання аварії існує певний проміжок часу (тривалість розвитку АС), протягом якого засоби контролю та відбиття повинні бути задіяні для досягнення успіху.

5.8. Оцінювання польотної безпеки в разі аварії під час пусків бойових ракет

Розроблені математичні моделі оцінювання ризиків для людей і наземних об'єктів у разі аварії РН (РКП) на етапі польоту мають значну універсальність, їх також використовують під час дослідження польотної безпеки бойових ракетних комплексів. Такий аналіз є актуальним під час проведення випробувальних і навчально-бойових пусків тактичних і оперативно-тактичних ракет (ТР/ОТР). Співвідношення (2)–(7) використовували для оцінювання ризику ураження пускових установок і особового складу, а також для побудови небезпечних зон для людей і суден (для суден розглянуто випадок, коли пуски передбачалося здійснювати в акваторії моря) [10].

Для розроблюваних ТР/ОТР з касетним бойовим оснащенням шляхом порівняльного аналізу небезпечних зон для людей (див. рис. 12) було, наприклад, обґрунтовано необхідність блокування задіяння

касетної бойової частини (КБЧ) у разі виявлення АС на етапі автономного польоту (з непрацюючою маршовою рушійною установкою) після зняття ступенів запобігання.

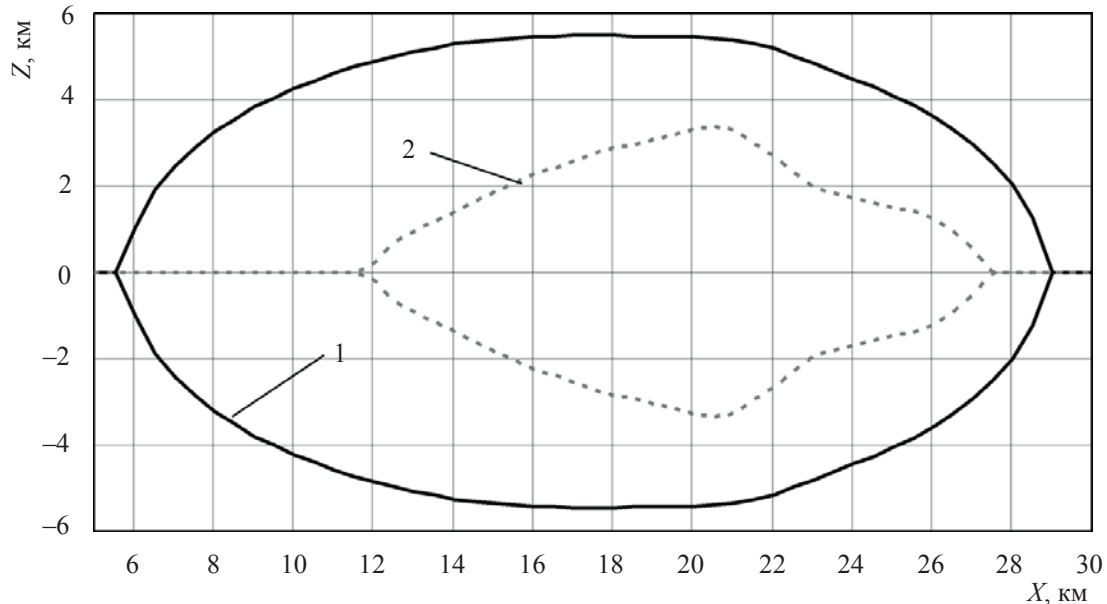


Рис. 12. Небезпечні зони для людей у випадку аварії ТР із КБЧ на етапі автономного польоту: 1 – у випадку розкриття КБЧ; 2 – у випадку блокування розкриття КБЧ

У разі виникнення АС ТР (ОТР) і відхилення її від розрахованої траєкторії з подальшим розкриттям КБЧ, зона можливого ураження людей виявилася значно ширшою (в ≈ 2 рази) порівняно з тим випадком, коли розкриття КБЧ блокувалося. Таким чином, в алгоритмі СБП ТР (ОТР) було передбачено команду блокування задіяння КБЧ у разі виявлення АС, що повинно призводити до менших розмірів небезпечної зони в межах полігону, обраного для проведення льотно-конструкторських і Державних випробувань.

Висновок

У статті наведено основні моделі розрахунку показників польотної безпеки, які було розроблено та використано в проектах на ДП «КБ «Південне».

Список використаної літератури

1. Гладкий Э. Г. Определение коллективного риска в случае аварии ракеты-носителя «Циклон-4М» на этапе полета с

использованием представления населенных территорий в виде многоугольников. Космична наука і технологія. К., 2020. Т. 26. № 3. С. 32–41.

2. Гладкий Э. Г. Определение риска для объектов стартового комплекса с учетом их обваловки в случае аварии ракеты-носителя на начальном участке полета. Техническая механика. Днепропетровск: ИТМ НАН и ГКА Украины, 2020. № 1. С. 31–41.

3. Гладкий Э. Г. Оценка риска поражения линейного объекта в случае аварии ракеты-носителя на этапе полета. Космична наука і технологія. Киев: ГАО, 2019. Т. 25. № 4. С. 22–28.

4. Гладкий Э. Г. Процедура оценки полетной безопасности ракет-носителей, использующая геометрическое представление зоны поражения объекта в виде многоугольника. Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. тр. Днепропетровск: ГПКБЮ, 2015. Вып. 3. С. 50–56.

5. Гладкий Э. Г., Крюков А. В. Определение вероятности падения аварийной ракеты-носителя на площадные объекты, расположенные вдоль трассы выведения.

Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. тр. Днепропетровск: ГКБЮ, 2008. Вып. 1. С. 81–90.

6. 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. тр. Днепропетровск: ГПКБЮ, 2011. Вып. 2. С. 266–280.

7. Гладкий Э. Г., Перлик В. И. Математические модели оценки риска для наземных объектов при пусках ракет-носителей. Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. тр. Днепропетровск: ГПКБЮ, 2010. Вып. 2. С. 3–19.

8. Гладкий Э. Г., Перлик В. И. Модель оценки уровня безопасности ракетно-космических систем. Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. тр. Днепропетровск: ГКБЮ. 2006. Вып. 1–2. С. 45–57.

9. Методика определения показателей безопасности по трассам пусков и в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей. ООО «НТЦ «Экон ЦНИИмаш», 2006.

10. Программа «Гром-2». Оперативно-тактический ракетный комплекс. Полетная безопасность. GR2 YZH ANL 016 00 [Исп. Гладкий Э. Г. Желудков А. В. и др.]

11. Программа «Циклон-4М». Ракетно-космический комплекс. Анализ полетной безопасности РКК. С4М YZH ANL 062 00. 2018. Вып. 1. 92 с. [Исп. Гладкий Э. Г., Желудков А. В. и др.].

12. Проект ТКРК Анализ приемлемости альтернативной точки # 7 для размещения КПЦ ТКРК SL-YN-TD-R-009

13. Разработка методических материалов по оценке степени риска по трассе полета и в районах падения отделяющихся частей при пусках средств выведения. Книга 1. Ме-

тодические материалы. НТО. ЦНИИмаш. 1990. 68 с.

14. Ракета космического назначения «Циклон-4». Уточнение характеристик зон падения РКН «Циклон-4» в случае аварии. Оценка безопасности выбранных мест размещения объектов НК КРК «Циклон-4». Циклон-4 21.16011.117 ОТ: Техн. отчет. Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2008. 110 с.

15. Ракета космического назначения «Циклон-4». Опасные зоны при аварийном полете РКН «Циклон-4». Циклон-4 21.16522.635 ОТ: Техн. отчет. Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2009. 69 с.

16. Увязка КА Лыбидь с РКК «Зенит-М»: Пояснительная записка Зенит-М. Лыбидь ПЗ, 2012. 363 с.

17. Хенли Э., Джм Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска: Под общ. ред. В. С. Сыромятникова. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.

18. Шатров Я. Т. Исследование проблемы выбора трасс пусков и сокращения зон отчуждения для перспективных систем выведения с учетом факторов безопасности и экономичности. Канд. Дис., ЦНИИмаш, 1980, 207 с.

19. 14 CFR, Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation Subchapter C – Licensing, part 420 – License to Operate a Launch Site, 2000

20. E. Gladky Mathematical Models of the Safety Assessment of Ground Facilities in Case of Failure of Launch Vehicle Equipped with Onboard Automatic Emergency Engine Shutdown/ Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. 2015. P. 9665 – 9675.

Стаття надійшла 01.09.2022