

<https://doi.org/10.15407/knit2023.03.003>
УДК 629.764.017.1

Е. Г. ГЛАДКИЙ, голов. наук. співроб., д-р техн. наук
В. І. ПЕРЛИК, д-р техн. наук, проф., наук. консультант. Заслужений діяч науки і техніки України
В. В. МЕДВЕДЕВ, нач. сектору відділу аерогазодинаміки та тепломасообміну
Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008
E-mail: info@yuzhnoye.com

ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ЗАПУСКУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РАКЕТИ-НОСІЯ ЛЕГКОГО КЛАСУ З ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

В даний час в Україні відбувається дискусія щодо створення національного ракетно-космічного комплексу (РКК) та можливості запуску космічних апаратів з власної території. Однією з основних перешкод щодо розміщення космодрому в Україні прийнято вважати густанаселеність території та неможливість забезпечити безпеку на етапі польоту ракети космічного призначення (РКП), що пов'язана із падінням на суміжні країни відокремлюваних частин під час штатного польоту та РКП (її фрагментів) у випадку аварії.

На сьогоднішній день у Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» розроблено проєкт перспективного РКК «Циклон-1М» із триступеневою РКП легкого класу, який дозволяє комплексно розв'язати проблему забезпечення польотної безпеки. Для нього обрано місце старту в Херсонській області та побудовано траєкторії польоту у південному напрямку для виведення космічних апаратів на сонячно-синхронну орбіту. Зроблено розрахунково-теоретичний аналіз безпеки під час штатного польоту РКП «Циклон-1М» та у випадку виникнення аварії РКП на етапі польоту, а також розроблено рекомендації щодо підвищення польотної безпеки.

Показано, що запропоновані технічні й організаційні рішення забезпечують виконання вимог до польотної безпеки для населення та інших об'єктів на прилеглий до точки старту території України, територіях Туреччини і країн Африки, які перебувають у зоні падіння аварійних РКП, а також суден в акваторіях Чорного й Середземного морів. Визначено небезпечні зони для суден у районі падіння відокремлюваних частин у Середземному морі. Для убезпечення суден, що розташовуватимуться у Середземному морі, потрібно виключити їхнє перебування в небезпечних зонах на час пуску РКП «Циклон-1М». Отриманий сумарний колективний ризик для населення в межах зони падіння аварійної РКП становить $3,46 \cdot 10^{-5}$, що забезпечує виконання міжнародних вимог до польотної безпеки. Основною проблемою на даний час є проліт РКП «Циклон-1М» над територією Чорноморського державного біосферного заповідника, на який можливе падіння аварійної РКП у випадку аварії на початковій ділянці траєкторії польоту.

Ключові слова: ракета космічного призначення, польотна безпека, зона падіння відокремлюваної частини, зона падіння аварійної ракети космічного призначення, небезпечна зона, колективний ризик, індивідуальний ризик.

Цитування: Гладкий Е. Г., Перлик В. І., Медведєв В. В. Щодо можливості запуску космічних апаратів з використанням ракети-носія легкого класу з території України. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 3 (142). С. 3–15. <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.003>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ВСТУП

Однією з головних проблем України як ракетно-космічної держави вважається відсутність національного космодрому і власної ракети-носія, здатної доставляти на навколосеземну орбіту космічні апарати (КА). Причиною цього у більшості випадків називається неможливість розміщення космодрому у межах густонаселеної території України та складності із прокладанням трас запуску КА. Отже, прийнято вважати, що основною перешкодою розміщення космодрому на території України є неможливість забезпечення безпеки на етапі польоту, пов'язаної з падінням відокремлюваних частин (ВЧ) і ракет-носіїв (або їхніх фрагментів) у випадку аварії. Так, наприклад, Максим Поляков, засновник українсько-американського космічного стартапу Firefly Aeraspace, зазначає, що у випадку створення космодрому в Херсонській області перший ступінь ракети-носія (РН) у процесі запуску КА має падати або на Росію або на Туреччину. Це, на його думку, неприпустимо. Вихід у такій ситуації багато хто вбачає у використанні концепції «Повітряного старту», вкрай дорогого й складного проекту.

Потрібно зауважити, у світі більшість наявних космодромів розташована таким чином, що траси запуску КА пролягають через малозаселені або взагалі незалюднені території. Так, значну кількість космодромів побудовано на узбережжях, а траєкторії обирають таким чином, щоб політ РН відбувається над океаном, де єдиними



Рис. 1. Траса пуску РН з космодрому Сичан (КНР)

об'єктами ураження є судна. У випадку, коли космодроми розташовані всередині країн, траси пуску РН намагаються прокладати таким чином, щоб вони більшою частиною пролягали через власні території, не завдаючи шкоди іншим державам. Це повною мірою стосується космодромів Байконур (Казахстан, Росія), Плесецьк, Восточний (Росія), Сичан, Цзюцюань (Китай). На рис. 1 показано трасу пуску РН для космодрому Сичан у Китаї.

Показовим є досвід Ізраїлю, який здійснив запуск національних КА «Офек» з використанням РН «Шавіт» зі своєї території з бази ВПС «Пальмахім». База розташована на узбережжі Середземного моря, і пуски відбуваються не на схід, як для більшості космодромів, а на захід проти напрямку обертання Землі. Пуски в інших напрямках виключено, адже суміжні країни розташовані близько. Отже траса запуску КА пролягає через Середземне море біля узбережжя Єгипту, Лівії, через південь о. Сицилії та Гібралтарську протоку.

РКП «ЦИКЛОН-1М» ТА ЇЇ ОСОБЛИВОСТІ

На даний час у ДП «КБ «Південне» розроблено проект перспективного ракетно-космічного комплексу (РКК) «Циклон-1М» із ракетою космічного призначення (РКП) легкого класу, який передбачає запуск РКП із наземного пускового пристрою. Триступеневу РКП «Циклон-1М» (рис. 2) на компонентах кисень та гас призначено для виведення КА на низькі навколосеземні орбіти [7].

Як точка старту РКП «Циклон-1М» розглядається майданчик із координатами 46.32° пн. ш. і 31.94° сх. д., який розташовано на півострові Ягорлицький кут (територія Голопристанського району Херсонської області) у ненаселеній місцевості. Найближчий населений пункт розташований на відстані більш ніж 5 км від точки старту.

З обраної точки старту планується виведення КА на сонячно-синхронну орбіту у південному напрямку з початковим азимутом 192.12° (рис. 3). Така траєкторія на ділянці польоту першого ступеня пролягатиме над територією України, акваторією Чорного моря, Туреччиною (політ РКП над територією Турецької республіки здійснюється на висоті більш ніж 100 км поза

межами її повітряного простору) і акваторією Середземного моря. На етапі польоту другого ступеня політ відбуватиметься над Середземним морем, Африканським континентом (територіями Єгипту, Судану, Центральної Африканської Республіки, Конго, Анголи).

Для триступеневої РКП «Циклон-1М» за результатами ескізного проектування, виходячи з показників безвідмовності вузлів, агрегатів та систем, прогнозується рівень польотної надійності не менш ніж 0.95. Надійність функціонування РКП на етапі польоту першого та другого ступенів відповідно становить 0.99 і 0.98.

РКП «Циклон-1М» буде обладнано системою безпеки польоту, що забезпечить виявлення аварійного стану РКП у польоті та реалізацію операцій припинення активного аварійного польоту шляхом аварійного вимкнення двигуна (АВД) задля зменшення зони можливого падіння аварійної РКП та її фрагментів.

ОЦІНКА БЕЗПЕКИ В РАЙОНАХ ПАДІННЯ ВІДОКРЕМЛЮВАНИХ ЧАСТИН РКП «ЦИКЛОН-1М»

У процесі польоту РКП «Циклон-1М» передбачається відокремлення й падіння на поверхню Землі ВЧ першого ступеня (далі ВЧ-1) і ступок головного обтічника (СГО). Траєкторії польоту РКП «Циклон-1М» побудовано таким чином, що райони падіння ВЧ-1 і СГО перебуватимуть у нейтральних водах Середземного моря. Розрахункові розміри районів падіння ВЧ РКП (що відповідають ймовірності 0.997) та їхнє розташування для двох базових траєкторій наведено в табл. 1, а також показано на рис. 5.



Рис. 2. Ракета космічного призначення «Циклон-1М»



Рис. 3. Траєкторія польоту РКП «Циклон-1М»

Таблиця 1. Характеристики районів падіння відокремлюваних частин першого ступеня і ступок головного обтічника під час штатного польоту РКП «Циклон-1М»

Траєкторія	Відокремлювана частина РКП	Дальність центра району падіння ВЧ від точки старту, км	Розміри еліпса розсіювання	
			ΔL_x , км	ΔL_z , км
Виведення КА масою 800 кг на висоту 500 км	ВЧ-1	1350	± 76	± 41
	СГО	1475	± 60	± 50
Виведення КА масою 250 кг на висоту 800 км	ВЧ-1	1430	± 78	± 42
	СГО	1610	± 59	± 49

Примітка: ΔL_x та ΔL_z — граничні відхилення точок падіння за дальністю та у бічному напрямку (півосі еліпса розсіювання).

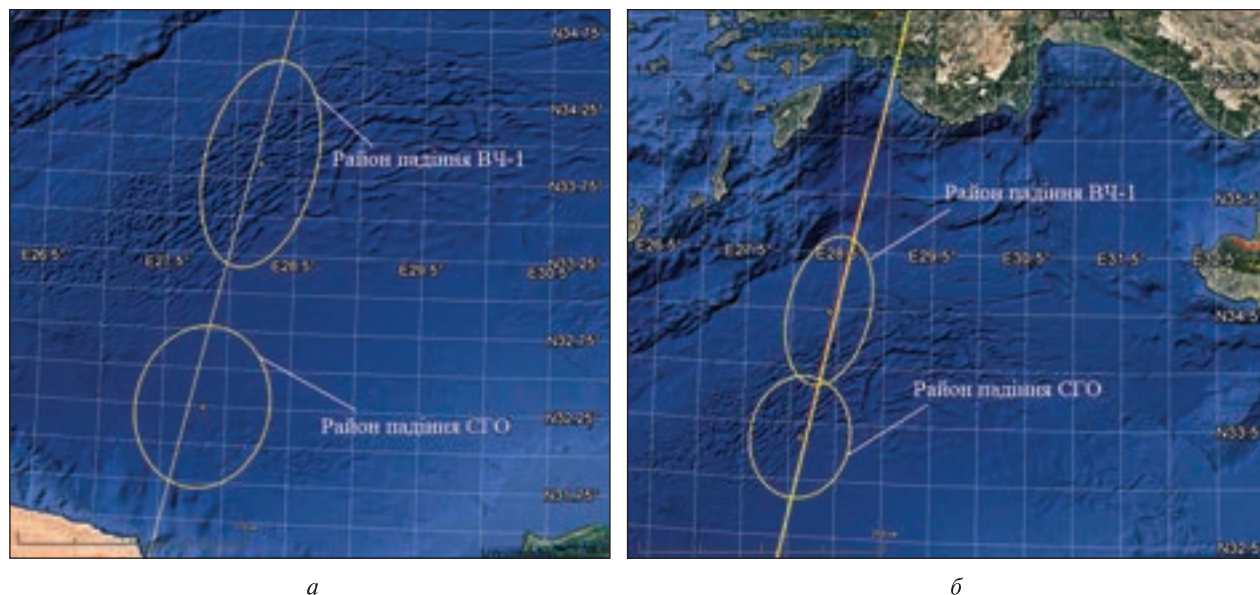


Рис. 4. Райони падіння ВЧ-1 і СГО для двох траєкторій виведення КА: *а* — траєкторія виведення КА масою 800 кг на висоту 500 км, *б* — траєкторія виведення КА масою 250 кг на висоту 800 км

Оскільки райони падіння відокремлюваних частин РКП «Циклон-1М» для розглянутих траєкторій польоту розташовані у морі, безпека оцінювалася для суден. Враховуючи висоту відокремлення кожної ВЧ (>100 км) і швидкість на цей момент (>4000 м/с), прогнозується, що ВЧ-1 і СГО у процесі пасивного падіння руйнуватимуться під дією аеродинамічних і теплових навантажень. Отже, небезпеку для суден становитиме динамічний вплив фрагментів.

Ймовірність R ураження (ризик) для судна, що перебуває у зоні падіння відокремлюваних частин РКП «Циклон-1М», визначалася добутком ймовірності $P_{ВЧ}$ безвідмовної роботи РКП до моменту відокремлення ВЧ (включаючи процес відокремлення) на ймовірність ΔR влучання хоча б одного фрагмента ВЧ у судно:

$$R = P_{ВЧ} \cdot \Delta R. \quad (1)$$

Для суден було розраховано максимальний рівень ризику, характерний для центра району падіння ВЧ, а також розміри небезпечних зон, у межах яких ризику для судна перевищують припустимий рівень 10^{-5} [4]. Небезпечні зони мають вигляд еліпсів, як показано на рис. 5.

У розрахунках прийнято, що у результаті руйнування ВЧ-1 поверхні Землі мають досяг-

ти не більше 20 фрагментів, а кожна стулка ГО руйнується на два фрагменти. Розміри кожного із фрагментів ВЧ не перевищуватимуть радіуса РКП (1.125 м). У процесі визначення ΔR для кожного із фрагментів використовувався нормальний закон розсіювання з математичним сподіванням, що відповідає центру району падіння ВЧ. Середні квадратичні відхилення точок падіння фрагментів ВЧ вважалися однаковими і визначалися виходячи з розмірів зон падіння ВЧ, які відповідають $\pm 3\sigma$.

Максимальний рівень ризику ураження для суден у районах падіння ВЧ згідно з виразом (1) становить $1.05 \cdot 10^{-4}$ для центра району падіння ВЧ-1 і $1.30 \cdot 10^{-5}$ для центра району падіння СГО. Небезпечні зони мають розміри: 56×30 км (площа 5278 км^2) — для району падіння ВЧ-1 РКП «Циклон-1М» та 15×12 км (площа 566 км^2) — для району падіння СГО.

Аналіз комп'ютерних карт руху кораблів у Середземному морі свідчить, що в зазначених районах падіння ВЧ залежно від часу доби може перебувати до 10 великих морських суден. Таким чином, для забезпечення суден на час проведення пуску РКП «Циклон-1М» необхідно, відповідно до прийнятих міжнародних норм,

виключити їхнє перебування у межах отриманих небезпечних зон.

ОЦІНКА БЕЗПЕКИ ДЛЯ НАСЕЛЕННЯ Й ОБ'ЄКТІВ У ВИПАДКУ АВАРІЇ РКП «ЦИКЛОН-1М» НА ЕТАПІ ПОЛЬОТУ

Методичні підходи. Оцінювання показників безпеки здійснювалося для таких об'єктів, які можуть перебувати в зоні можливого падіння аварійних РКП (її фрагментів): населення, морських суден, інших об'єктів, яким може бути заподіяно шкоди.

Для людей визначалися небезпечна зона у районі точки старту РКП, а також колективний ризик для населених територій уздовж траси польоту РКП. Небезпечна зона для людей — це територія, у межах якої рівень індивідуального ризику перевищує припустимий рівень (10^{-6}) [4]. Під індивідуальним ризиком мається на увазі ймовірність ураження аварійною РКП (її фрагментами) незахищеної людини, що перебуває на відкритій місцевості в точці з координатами (x, z) по відношенню до точки старту. Колективний ризик — це середня кількість загиблих на розглянутій території. Для морських суден ризиком ураження є ймовірність влучання аварійної РКП або її фрагментів у судно.

Імовірність ураження людини та інших об'єктів визначалася стосовно етапу польоту кожного ступеня за формулою [3]

$$R_{\Sigma} = \sum_{N_{\Delta t}} R_j, \quad (2)$$

де $N_{\Delta t}$ — кількість інтервалів розбиття часу польоту ступеня РКП (інтервали часу між моментами виникнення аварійних відмов, що призводять до припинення польоту); R_j — ймовірність ураження людини або об'єкта у випадку виникнення аварійної відмови РКП в інтервалі часу Δt .

Імовірності R_j визначатимуться з формули

$$R_j = Q \cdot P_{\Delta t} \frac{1}{t_j - t_{j-1}} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \Delta R(t) dt, \quad (3)$$

де Q — ймовірність аварійної відмови РКП на етапі польоту ступеня; $P_{\Delta t}$ — ймовірність виникнення аварійної відмови в інтервалі часу Δt ; $\Delta R(t)$ — ймовірність падіння аварійної РКП або її фрагментів у зону ураження об'єкта у випадку

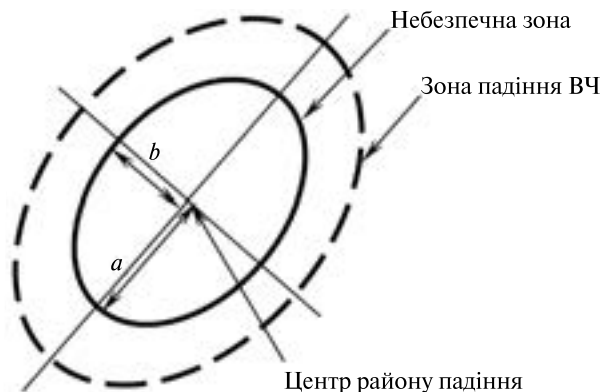


Рис. 5. Небезпечна зона в районі падіння ВЧ: a — більша піввісь еліпса, b — мала піввісь

аварії в момент часу t (точніше, у межах елементарного інтервалу dt).

Під час розрахунку індивідуальних ризиків область ураження окремої людини подавалася у вигляді круга, радіус якого відповідає радіусу ураження під час падіння аварійної РКП або її фрагментів. Для суден та інших площинних об'єктів зона ураження формувалася шляхом додавання до контуру об'єкта радіуса ураження. Площинні об'єкти, яким може бути нанесено збитку, у випадку падіння аварійної РКП або її фрагментів зображалися у вигляді багатокутників.

Для визначення колективного ризику на певній населеній території використовувалося таке загальне співвідношення [4]:

$$E_c = \sum_{N_{\text{фр}}} \sum_{N_{\Delta t}} P_{\text{НТ}} S_{\text{ур}} \lambda, \quad (4)$$

де $N_{\text{фр}}$ — кількість фрагментів аварійної РКП, що досягаються поверхні Землі; $P_{\text{НТ}}$ — ймовірність падіння фрагмента аварійної РКП у межі певної населеної території при виникненні аварії в інтервалі часу Δt ; $S_{\text{ур}}$ — площа ураження фрагмента, що досягає поверхні Землі; λ — щільність населення у межах території, що розглядається.

Населені території, що опинилися у зоні падіння аварійної РКП (польотному коридорі), поділялися на окремі частини у відповідності до адміністративного поділу, кожна із яких у свою чергу подавалася одним або кількома опуклими багатокутниками [1]. Координати багатокутників населених територій та площинних об'єктів визначалися з використанням електронних ат-

ласів. Імовірності P_{HT} визначалися з використанням співвідношення (3) [2].

Імовірність аварійної відмови на етапі польоту РКП. Імовірності виникнення аварійної відмови (Q) на ділянках польоту ступенів РКП в розрахунках дорівнювали: 0.01 — для першого ступеня і 0.02 — для другого. Імовірності виникнення аварійних відмов за часом $P_{\Delta t}$ на етапах польоту першого та другого ступенів визначалися на основі статистичного аналізу аварійних пусків РКП розробки ДП «КБ «Південне» [3]. Для кожного ступеня РКП на перші 5 % часу польоту припадає приблизно 25 % аварійних відмов, на останні 15 % часу польоту — близько 20 %, інші 55 % аварій розподіляються на інтервалі часу польоту ступеня, що залишився. У середині зазначених інтервалів часу закон розподілу імовірності виникнення аварійних відмов близький до рівномірного.

Прогнозований характер руйнування аварійної РКП після аварійного вимкнення двигуна. Попередні розрахунки міцності після АВД показують, що у випадку виникнення аварійної відмови приблизно до 55 с польоту аварійна РКП із імовірністю, близькою до одиниці, буде досягати поверхні Землі без руйнування. У випадку аварії РКП від 55 до 120 с після АВД очікується руйнування корпусу РКП по стику першого і другого ступенів. Поверхні Землі досягатимуть великі фрагменти РКП: ВЧ-1, другий ступінь (СТ-2) із головним обтічником (ГО) та «легкі» фрагменти обшивки РКП. У випадку аварії РКП після 120 с і до закінчення роботи першого ступеня спочатку відбуватиметься первинне руйнування конструкції по міжступеневому відсіку та прогар ГО. Далі у процесі падіння буде відбуватися подальша фрагментація утворених великих фрагментів, і насамперед баків. Поверхні Землі досягатимуть фрагменти ВЧ-1, частини міжступеневого відсіку, ВЧ-2, частини ГО й КА, елементи кріплення, кулебалони. У випадку аварії РКП на етапі польоту другого ступеня після АВД на ділянці пасивного падіння руйнування почнеться з циліндричного корпусу другого ступеня. Фрагменти, що досягатимуть поверхні Землі: частини корпусу СТ-2 з баком пального та з баком окиснювача, частини ГО й КА, дрібні фрагменти корпусу СТ-2, елементи кріплення, кулебалони.

Розміри зон падіння аварійної РКП та її фрагментів для різних моментів аварійного вимкнення двигуна (польотний коридор). Розрахункові розміри зон падіння аварійної РКП «Циклон-1М» та її фрагментів для характерних моментів АВД на ділянці польоту першого та другого ступенів наведено в табл. 2. Вони визначалися з використанням методу статистичного математичного моделювання з урахуванням відхилень кінематичних параметрів руху РКП від номінальних траєкторій та випадкових збурювальних факторів на ділянці польоту аварійної РКП від моменту аварійної відмови до моменту падіння (зокрема аеродинамічних характеристик аварійної РКП та їхніх розкидів; параметрів збуреного руху; висоти руйнування та її розкиду; термодинамічних параметрів атмосфери та їхніх розкидів). Окремо в таблиці наведено розміри зон падіння «легких» фрагментів, які утворюватимуться в процесі руйнування аварійної РКП після АВД у період з 55 с до 120 с включно. Зони падіння аварійної РКП «Циклон-1М» у вигляді обвідної кривої еліпсів розсіювання (права та ліва 3σ -межі) та еліпси розсіювання «легких» фрагментів для різних моментів АВД показано на рис. 6.

Оцінка негативного впливу на людей під час падіння аварійної РКП з компонентами ракетного палива. Під час падіння аварійної РКП з компонентами ракетного палива на територію України (до 55 с) негативний вплив на населення буде зумовлено: вибуховою ударною хвилею, термічним або токсичним впливом. Радіуси ураження (R_{yp}), які визначають розміри зон летального впливу для людей під час падіння РКП залежно від часу АВД (визначає масу залишків компонентів ракетного палива на борту) показано на рис. 7. Водночас не прогнозується наявності зон на поверхні Землі, в яких за час можливого токсичного впливу (до 30 хв) можуть бути сприйнятні персоналом або населенням летальні токсодози.

Оцінка небезпеки для населення на території України в районі точки старту. На рис. 8 показано небезпечну зону для населення, яка враховує розглянуті вище негативні фактори (вибухову ударну хвилю, термічний вплив внаслідок вибуху й виникнення «вогняної кулі» та динамічний вплив «легких» фрагментів).

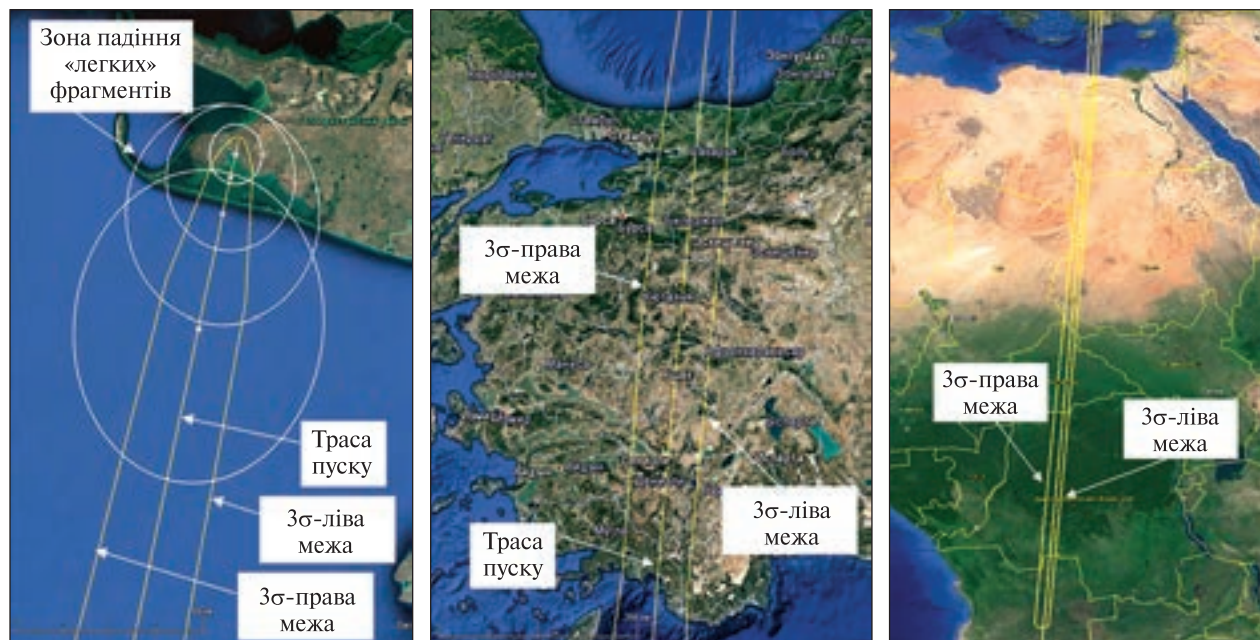


Рис. 6. Зони падіння аварійної РКП «Циклон-1М» та її фрагментів у випадку аварії на етапі польоту

Таблиця 2. Розміри зон падіння аварійних РКП (її фрагментів) для характерних моментів аварійного вимкнення двигуна

$t_{\text{АВД}}, \text{с}$	$\pm \Delta L_x, \text{км}$	$\pm \Delta L_z, \text{км}$	$L_{\text{Хср}}, \text{км}$	$\pm \Delta L_{\text{Хфр}}, \text{км}$	$\pm \Delta L_{\text{Зфр}}, \text{км}$	$\Delta L_{\text{Хфр}}, \text{км}$
<i>Перший ступінь РКП</i>						
20.53	0.15	0.15	0.01	—	—	—
55	2.0	2.0	1.4	7.1	7.1	+2.2
78.53	6.1	5.5	7.9	17.2	17.3	+1.6
100	26	11	38.1	26	26	-20
120	61	14	115.7	38	34	-70
178.53	66	43	698.4			
204.13	74	45	1185.3			
<i>Другий ступінь РКП</i>						
223.9	70	40	1100.8			
258.11	72	40	1272.3			
430.55	104	36	2403.5			
590	1258	53	5402.1			

Примітка: $t_{\text{АВД}}$ — час АВД; $\Delta L_x, \Delta L_z$ — розмір півосей еліпса розсіювання точок падіння аварійних РКП та їхніх фрагментів за дальністю та у бічному напрямку; $L_{\text{Хср}}$ — центри районів падіння (еліпсів розсіювання); $\Delta L_{\text{Хфр}}, \Delta L_{\text{Зфр}}$ — розмір півосей еліпса розсіювання точок падіння «легких» фрагментів аварійної РКП за дальністю та у бічному напрямку; $\Delta L_{\text{Хфр}}$ — відхилення за дальністю центра району падіння «легких» фрагментів відносно центра району падіння основних фрагментів, утворених під час руйнування аварійної РКП («+» — у попутному напрямку польоту РКП, «-» — у зворотному напрямку).

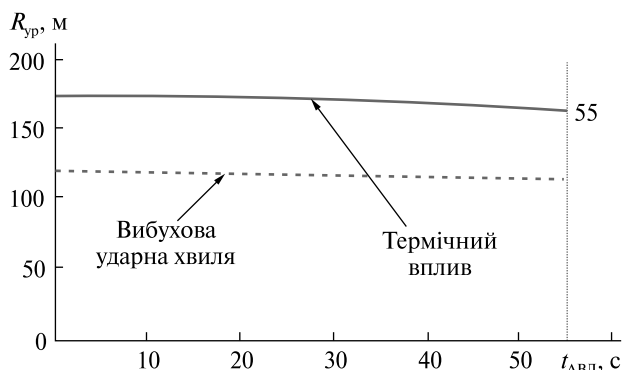


Рис. 7. Радіуси ураження під час падіння аварійної РКП «Циклон-1М» після аварійного вимкнення двигуна до 55 с

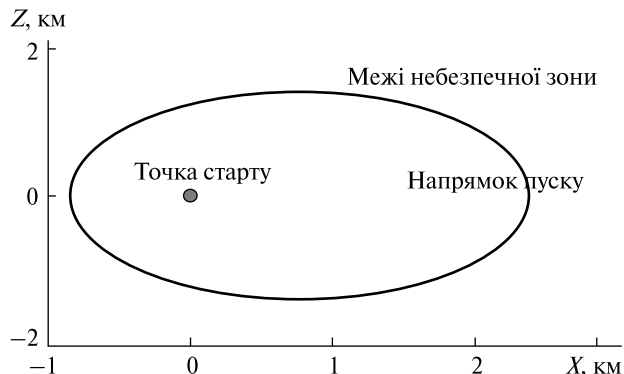


Рис. 8. Небезпечна зона для людей (населення) у районі точки старту РКП «Циклон-1М»

Таблиця 3. Характеристика регіонів Туреччини, що потрапляють у зону падіння фрагментів аварійних РКП і рівень колективного ризику для них

Іл (провінція)	Кількість населення, чол.	Щільність населення, чол./км ²	Площа, км ²	E_c
Стамбул (район Шіле)	28847	30.09	916	$2.50 \cdot 10^{-9}$
Коджаелі	1676202	331.8	3635	$5.56 \cdot 10^{-6}$
Сакар'я	917373	154.48	4895	$3.41 \cdot 10^{-6}$
Бурса	2550645	230.06	11087	$1.59 \cdot 10^{-6}$
Біледжик	208888	46.48	4181	$2.03 \cdot 10^{-6}$
Кютах'я	572059	54.2	12119	$3.08 \cdot 10^{-6}$
Ушак	346508	62.29	5174	$2.38 \cdot 10^{-6}$
Денізлі	993442	81.09	11716	$8.64 \cdot 10^{-6}$
Мугла	866665	56.25	12716	$1.89 \cdot 10^{-6}$
Ескішехір	706009	50.78	13904	$8.50 \cdot 10^{-8}$
Афйонкарахісар	701326	48.26	14532	$4.60 \cdot 10^{-8}$
Бурдур	256803	34.48	7238	$7.00 \cdot 10^{-8}$
Разом				$2.88 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 4. Колективний ризик для країн Африки, що потрапляють у зону падіння аварійної РКП

Країна	Адміністративна одиниця	Щільність населення, чол./км ²	E_c
Єгипет	Матрух	1.94	$6.33 \cdot 10^{-7}$
	Ваді-ель-Гедід	0.43	$1.79 \cdot 10^{-7}$
Судан	Північний штат	2	$2.10 \cdot 10^{-7}$
	Північний Дафур	7.13	$1.99 \cdot 10^{-6}$
	Західний Дафур	16.46	$1.63 \cdot 10^{-6}$
Центрально-Африканська Республіка		7.1	$9.14 \cdot 10^{-7}$
Конго		12	$2.1 \cdot 10^{-7}$
Ангола		20.69	$< 10^{-9}$
Разом			$5.76 \cdot 10^{-6}$



Рис. 9. Ситуаційна картина у випадку аварії РКП «Циклон-1М» на початковій ділянці польоту

Розташування небезпечної зони для людей на місцевості показано на рис. 9. У межах отриманої небезпечної зони відсутні постійні поселення та інші об'єкти, де можлива присутність людей. Водночас у зону падіння утворюваних «легких» фрагментів аварійної РКП «Циклон-1М» на території Голопристанського району потрапляють десять селищ (рис. 9): Очаківське, Вільна Дружина, Олександрівка (Краснознаменка до 2016 р.), Вільна Україна, Чорноморські Криниці, Лиманівка, Берегове, Облої, Збурівка, Тендровське (Комуна до 2016 р.). Найбільшим серед них є селище Олександрівка (населення 644 чол., площа — 2.2 км²), яке також і найближче розташоване до точки старту РКП (≈5.4 км). Імовірність падіння будь-якого із «легких» фрагментів на його територію у випадку аварії РКП «Циклон-1М» не перевищує $3.5 \cdot 10^{-6}$ (вважається прийнятним). Для інших селищ ця величина значно менша. Загальний колективний ризик для території України, що потрапляє у зону падіння аварійної РКП, не перевищує $2.7 \cdot 10^{-8}$.

Оцінка безпеки для населення на території Туреччини й країн Африки у випадку аварії РКП «Циклон-1М» на етапі польоту. У випадку виникнення аварії РКП «Циклон-1М» на етапі польоту першого ступеня в інтервалі часу між 170 с і 200 с можливе падіння фрагментів аварійної РКП на територію Туреччини (узбережжя Ту-

реччини віддалене на 590 км від точки старту). Поверхні Землі досягатимуть інертні фрагменти аварійної РКП, що не містять компонентів ракетного палива (у розрахунках прийнято, що кількість таких фрагментів не перевищить 50 штук, а максимальний розмір кожного фрагмента не перевищує діаметра РКП).

Провінції Туреччини, які потрапляють у зону падіння аварійної РКП та їхній поділ на окремі опуклі багатокутники для проведення розрахунків колективного ризику показано на рис. 10. Характеристику зазначених провінцій Туреччини, а також отримані для них рівні колективного ризику наведено в табл. 3.

У випадку аварії РКП «Циклон-1М» на ділянці польоту другого ступеня можливе падіння фрагментів аварійної РКП на територію держав Африки. Розрахункові значення рівня колективного ризику для країн Африки (і їхніх адміністративних одиниць), які потрапляють у аварійну зону РКП «Циклон-1М», наведено в табл. 4.

Враховуючи рівні колективного ризику для території України, Туреччини (табл. 3) та країн Африки (табл. 4), сумарний колективний ризик для населених територій, що потрапляють у межі польотного коридору, становить

$$E_{\Sigma} = 3.46 \cdot 10^{-5}.$$

Згідно з міжнародними нормами ця величина не повинна перевищувати $100 \cdot 10^{-6}$ [5, 6], отже



Рис. 10. Адміністративні одиниці Туреччини, які потрапляють у зону падіння аварійних РКП «Циклон-1М»

вимоги до безпеки населення вздовж трас польоту РКП «Циклон-1М» виконуються.

Оцінка небезпеки для деяких об'єктів, що перебуватимуть у зоні падіння аварійної РКП та її фрагментів. На початковій ділянці польоту траєкторія РКП «Циклон-1М» пролягає над територією Чорноморського державного біосферного заповідника. Площа заповідника становить 100 тис. га, з яких 14148 га — сухопутна частина й 77900 га — акваторії Тендровської і Ягорлицької заток, а також кілометрова смуга відкритого моря. На території заповідника мешкають птахи, тварини і комахи, занесені у Червону книгу України і Європейський Червоний список. Чорноморський державний біосферний заповідник внесено до Всесвітньої мережі біосферних резерватів у рамках програми ЮНЕСКО «Люди і біосфера». У межах аварійної зони траси пуску РКП «Циклон-1М» перебуває приблизно 136 км² заповідника (рис. 11). Розрахунки згідно з виразами (2) і (3) показують, що у випадку аварії РКП «Циклон-1М» на початковій ділянці польоту є



Рис. 11. Територія Чорноморського державного біосферного заповідника, яка потрапляє в зону падіння аварійної РКП «Циклон-1М»

досить високий рівень імовірності її падіння на територію заповідника, який становить $9.2 \cdot 10^{-4}$.

Оскільки РКП у випадку аварії буде досягати поверхні Землі не зруйнованою або у вигляді двох фрагментів (ОЧ-1 і СТ-2), що містять компоненти ракетного палива (насамперед гас), прогнозується серйозне екологічне навантаження на екосистему заповідника. У підсумку, враховуючи досить високу ймовірність падіння аварійної РКП на територію Чорноморського державного біосферного заповідника та можливі негативні наслідки, на даний момент ризик розглядається як *неприпустимий*, що потребує впровадження певних заходів.

Виходом у цій ситуації є планування діяльності, пов'язаної з проведенням запусків РКП «Циклон-1М» таким чином, щоб мінімізувати вплив і шкоду для довкілля, наприклад узгодження діяльності з періодами міграції та гніздування птахів тощо. Обов'язковою є розробка



Рис. 12. Озеро Сапанджа (Туреччина)

«Плану локалізації та ліквідації аварій» з метою ліквідації наслідків можливих аварій РКП на етапі польоту. Такі заходи потребують консультацій та узгодження з Національною академією наук України, Управлінням екології та природних ресурсів Херсонської ОДА та адміністрацією Чорноморського державного біосферного заповідника.

На території Туреччини в зону падіння фрагментів аварійної РКП «Циклон-1М» потрапляє озеро Сапанджа (рис. 12), яке є одним з небагатьох джерел питної води для населення країни. У випадку аварії РКП «Циклон-1М» на етапі польоту поверхні озера найімовірніше досягатимуть обгорілі фрагменти, що не містять компонентів ракетного палива. Імовірність падіння будь-якого фрагмента аварійної РКП «Циклон-1М» в озеро Сапанджа за розрахунками згідно (2) і (3) становить $2.6 \cdot 10^{-6}$. Значного екологічного впливу на екосистему озера під час падіння фрагментів аварійної РКП «Циклон-1М» не прогнозується. Отже, ризик слід вважати прийнятним.

У межі зони падіння аварійної РКП «Циклон-1М» потрапляють акваторії Чорного й Середземного морів. Максимальні ризики ураження для суден, пов'язані із влученням аварійної РКП

або її фрагментів безпосередньо у судно, слід очікувати при знаходженні суден уздовж траси польоту. При цьому найбільші ризики очікуються для суден у Чорному морі у випадку аварії РКП на етапі польоту першого ступеня. Максимальне значення в морі у безпосередній близькості від Тендровської коси (у 2...5 км від узбережжя) становить $1.7 \cdot 10^{-6}$, що значно нижче гранично припустимого рівня 10^{-5} . Далі уздовж траси польоту в Чорному морі, а також в акваторії Середземного моря ризики ураження для суден значно нижчі від гранично припустимого рівня.

ВИСНОВКИ

Розрахунки показують, що обрана точка старту РКП «Циклон-1М» на території Херсонської області та траєкторії польоту дозволять забезпечити безпеку як у випадку штатного польоту для суден в акваторії Середземного моря у зонах падіння ВЧ, так і у випадку аварії для населення на території України, Туреччини, країн Африки, а також суден в акваторіях Чорного і Середземного морів та інших об'єктів, що потрапляють у зону падіння аварійних РКП. Основною проблемою на даний час є проліт РКП над територією Чорноморського державного біосферного заповідника на території України, на який можливе падіння аварійної РКП у випадку аварії на початковій ділянці траєкторії польоту. Вирішення цієї проблеми вимагає додаткових організаційних рішень. Таким чином, зроблений для перспективного РКК «Циклон-1М» аналіз доводить принципову можливість створення пускового майданчика і проведення пусків РКП легкого класу з території України.

На нашу думку, після повернення тимчасово окупованих територій Херсонської області до України потрібно повернутися до розгляду питання створення національного космодрому з метою незалежного доступу до космічного простору.

ЛІТЕРАТУРА

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. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 3. С. 32—41. <https://doi.org/10.15407/knit2020.03.032>
2. Гладкий Э. Г. Процедура оценки полетной безопасности ракет-носителей, использующая геометрическое представление зоны поражения объекта в виде многоугольника. *Космическая техника. Ракетное вооружение*. 2015. № 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. № 2. С. 3—19.
4. AFSCPMAN 91-710 Range Safety User Requirements. 2016. Volume 1. URL: <http://static.e-publishing.af.mil/production/1/afspc/publicating/afspcman91-710v1/afspcman91-710v1.pdf> (дата звернення: 12.10.22).
5. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C – Licensing, part 417 – Launch Safety, 2001. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-417> (дата звернення: 12.10.22).
6. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C – Licensing, part 420 – License to Operate a Launch Site. 2000. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-420> (дата звернення: 12.10.22).
7. Cyclone-1m. URL: <http://www.old.yuzhnoye.com/tecniq/launch-vehicles/launch-vehicles/cyclone-1m/> (дата звернення: 12.10.22).

REFERENCES

1. Hladkii E. H. (2020). Determining the collective risk in case of launch vehicle «Ciclon-4M» crash in the flight phase by using polygons to represent populated territories. *Space Science and Technology*, **26**(3), 32—41 [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 objects during launches of launch vehicles. *Space technology. Missile armaments*, **2**, 3—19 [in Russian].
4. AFSCPMAN 91-710 Range Safety User Requirements. 2016. Volume 1. *Static.e-publishing.af.mil*. URL: <http://static.e-publishing.af.mil/production/1/afspc/publicating/afspcman91-710v1/afspcman91-710v1.pdf> (Last accessed: 12.10.22).
5. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C – Licensing, part 417 – Launch Safety, 2001. *Law.cornell.edu*. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-417> (Last accessed: 12.10.22).
6. 14 CFR. Chapter III. Commercial space transportation, Federal aviation administration, Department of transportation, Subchapter C – Licensing, part 420 – License to Operate a Launch Site. 2000. *Law.cornell.edu*. URL: <http://law.cornell.edu/cfr/text/14/part-420> (Last accessed: 12.10.22).
7. Cyclone-1m. URL: <http://www.old.yuzhnoye.com/tecniq/launch-vehicles/launch-vehicles/cyclone-1m/> (Last accessed: 12.10.22).

Стаття надійшла до редакції 06.10.2022

Після доопрацювання 16.03.2023

Прийнято до друку 17.03.2023

Received 06.10.2022

Revised 16.03.2023

Accepted 17.03.2023

E. Hladkyi, Dr. Sci. in Engineering, Chiefresearcher

V. Perlyk, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Scientific consultant. Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

V. Medvediev, Head of Sector, Department of Aerogas Dynamics and Heat and Mass Exchange

Yuzhnoye State Design Office

3, Kryvorizka Street, Dnipro, 49008 Ukraine

E-mail: info@yuzhnoye.com

ON THE POSSIBILITY OF LAUNCHING SPACECRAFTS USING LIGHT-CLASS LAUNCH-VEHICLE FROM THE TERRITORY OF UKRAINE

Currently, the discussion on the development of a national space launch system and the feasibility of spacecraft launching from its own territory is being held in Ukraine. One of the main obstacles to the deployment of the launch site in Ukraine is the dense population on its territory and the inability to ensure safety in the launch vehicle flight phase due to the hazard of separating parts impact on the neighbouring countries during the nominal mission and launch vehicle (its fragments) impact in the event of an accident.

To date, the project of the promising Cyclone-1M space launch system featuring a three-stage lightweight ILV has been developed in Yuzhnoye State Design Office, which will allow comprehensive tackling of the flight safety issue. It features the launch site in the Kherson region with the flight trajectories routed southward to place the spacecraft into the sun-synchronous orbit. The article provides a theoretical and computational safety analysis during the nominal mission of the Cyclone-1M ILV and in the event of an accident in the flight phase, as well as recommendations for flight safety improvement.

It is shown that the proposed technical and organizational solutions ensure the fulfillment of flight safety requirements for the population and facilities on the territory of Ukraine, adjacent to the launch point, on the territories of Turkey and African countries, which fall within the emergency ILV impact areas, as well as for vessels in the waters of the Black and Mediterranean Seas. Hazardous zones of the Mediterranean Sea for vessels in the areas of the fall of separating parts were calculated. To ensure the safety of vessels in the Mediterranean Sea, it is required to remove them from the hazardous zones during the ILV launch. The resulting total collective risk for the population within the emergency ILV impact area is $3.46 \cdot 10^{-5}$, which ensures the fulfillment of the international flight safety requirements. Now the main problem remains the ILV flight over the territory of the Black Sea State Biosphere Reserve, where an emergency ILV may fall in the event of an accident in the initial flight phase.

Keywords: integrated launch vehicle, flight safety, separating parts' impact area, emergency ILV impact area, hazardous zone, collective risk, individual risk.