В.Л. Місайлов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВЛАСТИВОСТІ ВИХРОВИХ КІЛЕЦЬ ЯК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЦІЛЕЙ НА РІЗНИХ ЕТАПАХ ЇХ ІСНУВАННЯ

Вихрові кільця (тороїдальні вихрі) є сталою формою руху в атмосфері. Також вони є передвісником або результатом небезпечних явищ, наслідків яких можна уникнути за умови вчасного виявлення вихрових кілець за допомогою активних радіолокаційних засобів. Проведено моделювання та експериментальне вимірювання швидкості гальмування вихрового кільця та втрати речовини з його атмосфери за дальністю. Для різних етапів існування вихрових кілець експериментально визначено ширину спектру відбитого сигналу. Проведено розрахунки ефективної площі розсіювання вихрових кілець на початковому та кінцевому етапі їх існування, де найбільш яскраво виражені відмінності їх форми і електричних властивостей.

Ключові слова: вихрове кільце, радіолокаційна ціль, ефективна площа розсіювання, швидкість руху, ширина спектру.

Вступ

Постановка проблеми. Атмосфера є найрухливішою оболонкою нашої планети. Серед форм руху повітря найстійкішим є вихровий рух [1]. Якщо вихор замикається сам на себе, то виникає так зване вихрове кільце – форма руху повітря, що має тривалий час існування і може долати значні

відстані до розпаду [2–3].

Зовнішній вигляд вихрового кільця (ВК), підфарбованого димом, наведений на рис. 1 [4]. ВК складається з ядра та атмосфери і поступально рухається із швидкістю v_{BK} .

Вихрові кільця (ВК) в атмосфері можуть мати як природне, так і штучне походження.

Рис. 1. Вигляд вихрового кільця із аерозольним наповненням: а – вигляд прямо; б – вигляд з боку

Вихрові кільця (ВК) в атмосфері можуть мати як природне, так і штучне походження. Прикладом природних ВК є терміки [5–7] та газові викиди в наслідок вулканічної діяльності [8] (рис. 2). В районі терміка формуються потужні висхідні і низхідні потоки повітря, що можуть бути небезпечними для літальних апаратів. Штучно ВК у повітрі можуть виникати в наслідок:

- аварійної розгерметизація ємності із стисненим газом (що є аналогом лабораторного генератора вихрових кілець на кшталт ящика Вуда [4; 9–11]);
- згоряння хмари пального [12];
- підриву заряду вибухівки [4].

Рис. 2. Вихрове кільце з вулкану Етна (08.06.2000 р.)

Отже поява вихрового кільця у повітрі є передвісником або результатом небезпечних явищ, і, якщо ВК вдасться виявити засобами спостереження, то це надасть можливість запобігти певні негативні наслідки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай ВК фіксуються вдень у оптичному діапазоні випадковими спостерігачами [13–14]. Виключенням є, хіба що, спостереження за викидами вулканів [15], де організовано цілодобове відеоспостереження (в тому числі і в інфрачервоному діапазоні).

Враховуючи, що ВК є неоднорідністю повітря, то до їх виявлення доцільно залучити метеорологічні радіолокаційні станції (РЛС), фізичний принцип роботи яких якраз і заснований на відбитті радіохвиль від неоднорідностей атмосферного повітря [6]. Здатність РЛС виявляти ВК великих розмірів (вологі терміки із великими градієнтами діелектричної проникності на межі навколишнє повітря-термік) практично була доведена ще у [16].

Наразі продовжуються роботи по радіолокаційному виявленню лінійних вихорів, що залишають по собі літаки [17], де і просторові розміри, і градієнти діелектричної проникності є значно меншими [18]. Невелика радіоконтрастність вихорів вимагає залучення додаткових ознак для їх ототожнення. За відсутності повної інформації про об'єкт, що спостерігається, навіть за сучасного розвитку радіолокаційної техніки класифікація відбиттів є досить складною [19].

Мета статті – розробка моделі та оцінка властивостей вихрових кілець як радіолокаційних цілей на різних етапах їх існування.

Виклад основного матеріалу

Для розрахунку ефективної площі розсіяння будь-якого об'єкта необхідно знати його форму і електричні властивості [20].

1. Геометричні параметри вихрових кілець на різних етапах їх існування

Основні геометричні параметри ВК наведені на рис. 3 [4].

Рис. 3. Параметри вихрового кільця:

а – основні визначення параметрів вихрового кільця;
б – зміна розмірів вихрового кільця вздовж траєкторії

Вихрове кільце радіусом R_{BK} має ядро радіусом r_{BK} , яке оточено атмосферою ВК.

Атмосфера ВК являє собою еліпсоїд обертання, із розмірами осей $2a_{BK}$ та $2b_{BK}$, який трішки стиснутий з боку напрямку руху ВК.

Ядро ВК обертається навколо своєї осі із кутовою швидкістю ω_{BK} . В атмосфері вихору кутова швидкість обертання зменшується до нуля на його зовнішній межі. За даними [4], атмосфера ВК має наступні розміри: $a_{BK} = R_{BK} + 1,2r_{BK}$, $a_{BK} = 1,5b_{BK}$.

Початкові характеристики ВК суттєво залежать від способу їх утворення, тобто від виду і режиму роботи генератора вихрових кілець (ГВК) [21].

Найпростішими є ГВК поршневого типу (рис. 4).

Рис. 4. Генератор вихрових кілець поршневого типу

Такий генератор складається із робочої камери (РК) та поршня. У передній стінці робочої камери зроблений отвір діаметром $2R_{отв}$. Під час руху

поршня вперед, вміст РК виштовхується крізь отвір, і утворюється імпульсний струмінь довжиною L_j із швидкістю v_j , який за умови $0,75 \leq L_j \cdot 0,5R_{омв}^{-1} \leq 4,75$ згортається у стале вихрове кільце, що поступально рухається із початковою швидкістю v_{0BK} ($0,43 < v_{0BK} \cdot v_j^{-1} < 0,69$) [21].

Початковий радіус ВК R_{0BK} та його ядра r_{0BK} визначаються як [21–22]:

$$R_{0BK} = R_{омв} \left(1 + 2,25 \left(\frac{L_j}{2R_{омв}} \right) \cdot \text{Re}_o^{-\frac{1}{4}} \right), \quad (1)$$

де $\text{Re}_{омв} = \frac{2R_{омв} \cdot \rho_j \cdot v_j}{\eta_j}$ – число Рейнольдса для отвору;

ρ_j – густина струменя;

η_j – динамічна в'язкість струменя.

$$r_{0BK} = 0,85R_{омв} \left(\frac{L_j}{2R_{омв}} \right)^{\frac{5}{12}} \text{Re}_{омв}^{-0,25}. \quad (2)$$

Під час руху R_{BK} змінюється відповідно до виразу [21–22]:

$$R_{BK}(L) = R_{0BK} + \alpha_{BK}L, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт збільшення радіусу ВК із відстанню, $10^{-3} \leq \alpha \leq 10^{-2}$ (рис. 3, б);

L – відстань, пройдена ВК;

Зміну r_{BK} із відстанню можна знайти із міркувань, що ядро ВК повинне зберігати свій об'єм, тоді:

$$r_{BK}(L) = \left(\frac{2\pi^2 \cdot R_{0BK} \cdot r_{0BK}^2}{2\pi^2 \cdot R_{BK}} \right)^{0,5} = \frac{r_{0BK}}{\sqrt{1 + \frac{\alpha_{BK}L}{R_{0BK}}}}. \quad (4)$$

Залежність пройденого шляху від часу $L(t)$ та його максимальне значення $L_{\max}$, а також швидкість руху v_{BK} та максимальний час існування ВК $t_{\max}$ визначаються як [21–22]:

$$L(t) = \frac{R_{0BK}}{\alpha_{BK}} \left[\left(1 + \frac{\alpha_{BK} \cdot v_{0BK} \cdot (c_D + 4)}{R_{0BK}} t \right)^{\frac{1}{c_D + 4}} - 1 \right], \quad (5)$$

де $c_D = 3\pi \left(\ln \frac{8R_{0BK}}{r_{0BK}} + \frac{1}{3} \right)^{-1}$ – коефіцієнт опору руху ВК, $1,88 \leq c_D \leq 2,19$.

$$L_{\max} \approx \frac{(R_{0BK} \cdot v_{0BK})^{0,75}}{3,92 \cdot \alpha_{BK}^{0,5} \cdot (v_{турб})^{0,25}}, \quad (6)$$

де $v_{турб}$ – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності, $1 \cdot 10^{-4} \leq v_{турб} \leq 1 \cdot 10^{-2}$ в залежності від стійкості шару атмосфери [23].

$$v_{BK}(t) = v_{0BK} \left(1 + \frac{\alpha_{BK} \cdot v_{0BK} \cdot (c_D + 4)}{R_{0BK}} t \right)^{\frac{c_D + 3}{c_D + 4}}; \quad (7)$$

$$t_{\max} \approx \frac{0,4(R_{0BK} \cdot v_{0BK})^{0,5}}{3,92 \cdot \alpha_{BK}^{0,25} \cdot (v_{турб})^{0,5}}. \quad (8)$$

Результати розрахунків за формулами (6) і (8) для “товстих” ВК ($L_j \cdot 0,5R_o^{-1} = 4,75$ та $\alpha_{BK} = 10^{-2}$) у стійкій атмосфері ($v_{турб} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^3$) із різними початковими радіусами та швидкостями наведено у табл. 1. З урахуванням великої кількості припущень при формулюванні виразів (6), (8) до результатів розрахунків за ними слід ставитись скоріше як до оцінки порядку отриманих величин, що співпадає із експериментальними даними у певних випадках, ніж до конкретних числових значень.

Проаналізувавши дані табл. 1, можна зробити висновки, що із збільшенням розмірів та початкової швидкості ВК збільшується їх час існування та максимальна пройдена відстань. Величина $L_{\max}$ не є прямо пропорційною $t_{\max}$, тобто швидкість ВК із дистанцією змінюється. Оцінимо цю залежність.

Таблиця 1

Результати розрахунків геометричних розмірів та параметри руху ВК за різних початкових умов

R_{0BK} , м	v_{0BK} , м/с	$L_{\max}$, м	$t_{\max}$, с
0,5	1	15	23
	5	50	51
	10	85	72
1	1	26	32
	5	85	72
	10	143	102
2	1	43	46
	5	143	102
	10	241	144

2. Швидкісні параметри вихрових кілець на різних етапах їх існування

Для визначення виду функції $v_{BK}(L)$ сумісно вирішімо рівняння (5) та (7), і в результаті отримаємо залежність швидкості ВК вздовж траєкторію руху:

$$v_{BK}(L) = v_{0BK} \left(\alpha_{BK} \frac{L}{R_{0BK}} + 1 \right)^{-3-c_D}. \quad (9)$$

На рис. 4 наведено результати розрахунків зміни нормованої швидкості ВК від нормованої дальності для різних коефіцієнтів опору руху.

З рис. 5 видно, що $v_{BK}(L)$ зменшується в здовж траєкторії (на відстані у $60 R_{0BK}$ складає $\approx 10\%$ від початкової), і ця залежність слабо чутлива до зміни c_D .

Рис. 5. Зміна швидкості ВК вздовж траєкторії

3. Електричні параметри вихрових кілець на різних етапах їх існування

З рис. 1 та 2 видно, що під час руху ВК залишає по собі слід, тобто втрачає власний вміст. Корисною для нас властивістю ВК є те, що, наприклад, аерозоль, штучно введений до ВК, потрапляє у навколишнє повітря переважно зі сліду ВК та майже без втрат переноситься його ядром. Це визначатиме відбивну здатність елементів ВК вздовж траєкторії руху. Зміна маси аерозолу у ВК вздовж траєкторії його руху визначається як [24]:

$$m_{BK}(L) = m_{яBK} + m_{aBK0} \left(1 + \frac{\alpha_{BK} \cdot L}{R_{0BK}} \right)^{-\frac{\beta}{\alpha_{BK}}}, \quad (10)$$

де $m_{яBK}$ – маса аерозолу у ядрі ВК;

m_{aBK0} – початкова маса аерозолу у атмосфері ВК;

$\beta = 0,1$ – напівемпіричний коефіцієнт, який в широкому діапазоні умов формування стійких ВК є практично сталим.

Початкова концентрація аерозолу у ядрі та атмосфері ВК є однаковою. Тому можна визначити, як змінюється концентрація аерозолу в атмосфері ВК вздовж траєкторії руху.

Із (10) знайдемо масу аерозолу в атмосфері ВК:

$$m_{aBK}(L) = m_{aBK0} \left(1 + \frac{\alpha_{BK} \cdot L}{R_{0BK}} \right)^{-\frac{\beta}{\alpha_{BK}}}. \quad (11)$$

А з (11) вже можна визначити зміну концентрації аерозолу $\rho_{aBK}(L)$ в атмосфері ВК із відстанню:

$$\rho_{aBK}(L) = \rho_{aBK0} \frac{V_{aBK0}}{V_{aBK}(L)} \left(1 + \frac{\alpha_{BK} \cdot L}{R_{0BK}} \right)^{-\frac{\beta}{\alpha_{BK}}}, \quad (12)$$

де ρ_{aBK0} – початкова концентрація аерозолу у атмосфері ВК;

V_{aBK0} і $V_{aBK}(L)$ – об'єм атмосфери ВК в початковий момент і вздовж траєкторії відповідно.

Графік, що ілюструє нормовану залежність (12) від нормованої відстані для різних α_{BK} наведений на рис. 6. Як видно з рисунку, концентрація аерозолу в атмосфері ВК із дальністю зменшується дуже швидко, і вже на відстані $20 R_{0BK}$ складає приблизно 10% від початкової. Тобто при розрахунках ефективної площі розсіювання (ЕПР) ВК форму і діелектричну проникність атмосфери вихрового кільця необхідно враховувати лише на початковій стадії існування ВК, а на решті дистанції ними можна нехтувати і обчислювати ЕПР лише тороподібного ядра.

Рис. 6. Зміна концентрації речовини в атмосфері ВК

4. Експериментальні результати

Для перевірки теоретичних розрахунків було створено лабораторну установку (рис.7), подібну описаної у [4]:

Рис. 7. Зовнішній вигляд експериментальної установки генерування вихрових кілець

Від ГВК, зображеного на рис. 4, вона відрізняється тим, що виштовхування вмісту робочої камери здійснюється не поршнем, а імпульсом стисненого повітря з ресивера. Параметри імпульсу визнача-

ються часом відкриття електромагнітного клапану, який керується персонально електронною обчислювальною машиною (ПЕОМ) через цифро-аналоговий канал цифрового осцилографа (ЦО) Bordo B-421 і силовий ключ IRF520. Розмір отвору робочої камери був $2R_{отв}=110$ мм. Швидкість руху створюваних ВК визначалась за відеозаписами їх пересування вздовж спеціально нанесених міток дальності. Після обробки матеріалів було отримано, що $v_{0BK}=0,8-1$ м/с. Для візуалізації ВК в якості підфоновувача використовувалась пара рідини для дим-машин SFI-HARD.

Нормовані результати вимірювання $v_{BK}(L)$ наведені на рис. 5. Відхилення експериментальних результатів від теоретичних розрахунків можна пояснити методичною похибкою в наслідок наявності зустрічного протягу в місці проведення експерименту, усунути який повністю не вдалося. Визначення кількості речовини в атмосфері ВК визначалась за ступенем ослаблення лазерного випромінювання при проходженні ВК між лазерним модулем KY-008 і фотоприймачем на основі фоторезистору GL5549. Схема експерименту наведена на рис. 8.

Рис. 8. Визначення концентрації аерозолі в атмосфері вихрового кільця:

Рівень напруги на виході фотоприймача записувався на ПЕОМ через ЦО (на рис. 7 – B-421(2))

Нормовані результати вимірювання $\rho_{aBK}(L)$ наведені на рис. 6. Відхилення експериментальних результатів від теоретичних розрахунків можна пояснити тією ж методичною похибкою, що і для $v_{BK}(L)$.

Схема експерименту для визначення спектру сигналу, відбитого від ВК, була подібна наведеній на рис. 8 за виключенням того, що фотоприймач розташовувався поруч із лазерним модулем, а не навпроти. Результати обробки вимірювань (ширина

спектру відбитого сигналу Δf за рівнем 0,5 та 0,1 за потужністю) наведені у табл. 2.

Малі і близькі за значенням величини $\Delta f_{0,5}$ свідчать, що ядро ВК на протязі часу його існування обертається як єдине ціле (подібно до твердого тіла як і в експериментах [4]). Збільшення $\Delta f_{0,5}$ на кінцевому етапі існування ВК можна пояснити похибкою, що виникає через зменшення часу спостереження ВК, коли аерозоль залишається лише у тонкому ядрі, а з атмосфери ВК він майже повністю зникає. Відносно великі значення $\Delta f_{0,1}$ на початковому етапі можна пояснити великою кількістю аерозолі в атмосфері ВК, і активним його висипанням у слід вихрового кільця, що ускладнює визначення межі між атмосферою і слідом ВК.

Таблиця 2

Ширина спектру сигналу, відбитого від ВК

Етап існування ВК	Ширина спектру сигналу, Гц	
	$\Delta f_{0,5}$	$\Delta f_{0,1}$
Початковий	1,8	13,8
Середній	1,6	9,8
Кінцевий	2,0	5,8

5. Ефективна площа розсіювання ВК

Як було показано у попередніх розділах, на початковому етапі свого існування ВК являє собою еліпсоїд обертання із великою концентрацією речовини, з якої утворилося ВК (вологого повітря, газу, завису аерозолі, тощо).

На кінцевому етапі існування ВК в його атмосфері переважає навколишнє атмосферне повітря, і лише ядро ВК має майже первинну концентрацію початкової речовини. Це є крайні варіанти форм і електричних характеристик ВК, що визначають його відбивні властивості.

Для оцінки ЕПР ВК на різних етапах його існування було виконано розрахунки із використанням пакету програм для вирішення електродинамічних задач Altair Feko. Вихідні дані, використані для моделювання наведені у табл. 3.

Кут падіння радіохвиль Θ відраховується від осі ВК.

Таблиця 3

Вихідні дані для моделювання ЕПР ВК

Параметр	Значення
R_{0BK} , м	0,5
r_{BK} , м	0,1
$L \cdot R_{0BK}^{-1}$	30
α_{BK}	0,001
R_{BK} , м	0,515
r_{BK} , м	0,099

Закінчення табл. 3

Діелектрична проникність речовини ВК ε_{BK}	1,0076 (аміак) 1,0035 (пентан)
Частота радіохвиль f_0 , ГГц	1

Величина ε_{BK} дуже близька до 1, в наслідок чого ЕПР за горизонтальної і вертикальної поляризацій майже однакові. Тому далі наведені результати розрахунків лише для горизонтальної поляризації.

На рис. 9 наведено розрахункові значення ЕПР ВК на початковому етапі існування (ВК – однорідний еліпсоїд обертання) для різних наповнювачів. Графіки мають осцилюючий характер, що пояснюється зміною електричних розмірів еквівалентного перетину діелектричного еліпсоїду із зміною кута опромінювання. Також, що очікувано, для ВК із більшим ε_{BK} ЕПР буде більше. ЕПР у випадку опромінювання в фаз ($\Theta = 0^\circ$) більша ніж у випадку опромінювання у профіль ($\Theta = 90^\circ$) через більшу площу перетину ВК у першому напрямку.

Рис. 9. ЕПР ВК на початковому етапі існування

На рис. 10 наведено розрахункові ЕПР для ВК наповненого аміаком на початковому і кінцевому (наповнювач залишився лише у ядрі) етапах існування.

Рис. 10. ЕПР ВК на різних етапах його існування

Висновки

Поява вихрового кільця у повітрі є передвісником або результатом небезпечних явищ, і якщо ВК вдасться виявити засобами спостереження, то це надасть можливість запобігти певні негативні наслідки. Для вчасного виявлення ВК у повітрі доцільно застосовувати активні радіолокаційні засоби.

Вихрове кільце радіусом R_{BK} має ядро радіусом r_{BK} , яке оточено атмосферою ВК. Атмосфера ВК являє собою еліпсоїд обертання, із розмірами осей $2a_{BK}$ та $2b_{BK}$, який трішки стиснутий з боку напрямку руху ВК. Величини осей еліпсоїду дорівнюють: $a_{BK} = R_{BK} + 1,2r_{BK}$, $b_{BK} = 1,5r_{BK}$.

Під час руху за траєкторією, швидкість вихрового кільця зменшується нелінійно і на відстані у 60 R_{0BK} складає $\approx 10\%$ від початкової. Експериментальні дані, отримані автором, щодо гальмування ВК із відстанню, в цілому співпадають із теоретичними розрахунками. Різницю можна пояснити методичною похибкою, що виникла через наявність в приміщенні, де виконувались експерименти, зустрічного протягу, який не вдалося повністю усунути. Швидкість гальмування ВК у повітрі слабо чутлива до зміни величини його коефіцієнта опору руху. На початковому етапі свого існування ВК у повітрі мають однорідну атмосферу із великою кількістю речовини, з якої воно утворилось. Під час руху ця речовина переходить у слід ВК, тому на кінцевому етапі вона залишається лише у ядрі вихрового кільця. Експериментальні дані щодо зміни концентрації речовини у атмосфері ВК під час його руху в цілому співпадають із теоретичними розрахунками. Різницю можна пояснити тією ж методичною похибкою, що і при вимірюванні швидкості гальмування ВК.

Зменшення концентрації речовини у еліпсоїдоподібній атмосфері ВК із часом та практична сталість концентрації речовини у тороподібному ядрі визначають варіанти форм і електричних характеристик вихрового кільця, які, свою чергу, визначають його відбивні властивості.

Експериментально отримані спектри сигналів відбитих від ВК на різних етапах їх існування є дуже вузькими. Їх ширина за рівнем половинної потужності складає одиниці герц. Із застосуванням пакету програм для вирішення електродинамічних задач Altair Feko було проведено розрахунки ефективної площі розсіювання вихрових кілець на різних етапах їх існування. Для початкового етапу існування (ВК – однорідний еліпсоїд обертання) розрахункові графіки ЕПР ВК мають осцилюючий характер, що пояснюється зміною електричних розмірів еквівалентного перетину діелектричного еліпсоїду із зміною кута опромінювання. Із збільшенням відносної діелектричної проникності речовини ВК ЕПР також зрос-

тає. ЕПР у випадку опромінювання ВК в фаз ($\Theta = 90^\circ$) більша ніж у випадку опромінення у профіль ($\Theta = 90^\circ$) через більшу площу перетину ВК у першому напрямку. Для кінцевого етапу існування ВК (наповнювач залишився лише у ядрі) графік ЕПР є більш порізаним, ніж для початкового. Це поясню-

ється інтерференцією відбитих хвиль через появу двох домінуючих відбивачів у вигляді колоподібних перерізів тороподібного ядра ВК.

Також загальний рівень ЕПР ВК на кінцевому етапі приблизно на 10 дБ менший ніж на початковому, що пояснюється зменшенням кількістю речовини у атмосфері ВК із часом.

Список літератури

1. Путята В.Й. Гідроаеромеханіка / В.Й. Путята, М.М. Сідляр. – К.: Вид. КУ, 1963. – 480 с.
2. Vortex rings and plasma toroidal vortices in a homogeneous infinite medium / U. Yusupaliev, S.A. Shuteev, E.E. Vinke, P.U. Yusupaliev // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2010. – № 8(37). – P. 227-233. <https://doi.org/10.3103/S1068335610080014>.
3. Meleshko V.V. Vortex rings: history and state of the art / V.V. Meleshko, A.A. Gourjii, T.S. Krasnopol'skaya // *Journal of Mathematical Sciences*. – 2012. – № 6(187). – P. 772-808. <https://doi.org/10.1007/s10958-012-1100-0>.
4. Akhmetov D.G. Vortex rings / D.G. Akhmetov. – Berlin: Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 150 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05016-9>.
5. Yano J.I. Basic convective element: bubble or plume? A historical review / J.I. Yano // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – № 13(14). – P. 7019-7030. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7019-2014>.
6. Fukao S. Radar for meteorological and atmospheric observations / S. Fukao, K. Hamazu. – Tokyo: Springer Japan, 2014. – 556 p. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54334-3>.
7. Вульфсон А.Н. Система конвективных термиков как обобщённый ансамбль броуновских частиц / А.Н. Вульфсон, О.О. Бородин // *Успехи физических наук*. – 2016. – Т. 186, № 2. – С. 113-124. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0186.201602a.0113>.
8. Spectacular, incredible, amazing rarely seen smoke rings at Mt Etna [Electronic resource]. – Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=VbV98Z0QP-k>.
9. Вуд Р. Вихревые кольца / Р. Вуд // *Квант*. – 1971. – № 12. – С. 28-30.
10. Генерация крупномасштабных излучающих вихревых структур при торможении импульсных плазменных струй в воздухе / М.Н. Жарников, А.С. Камруков, И.В. Кожевников, Н.П. Козлов, И.А. Росляков // *Журнал технической физики*. – 2008. – № 5(78). – С. 38-46.
11. Lucey George K. Vortex Ring Generator: Mechanical Engineering Design for 100-kpsi Operating Pressures [Electronic resource] / K. George Lucey. – 2000. – Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a372518.pdf>.
12. Кузнецов А.А. Метеотрон : монография / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов. – Владимир: ВлГУ, 2015. – 232 с.
13. Загадочное черное кольцо кружило в небе на севере Казахстана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://today.kz/news/zhizn/2015-04-04/610200-strannoe-chnoe-kolco-zafiksirovali-v-nebe-na-severe-kazahstana-video/>.
14. Чёрное кольцо в небе Казахстана. Поселок Шортанды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=VbV98Z0QP-k>.
15. Volcanoes blow smoke rings. Now we know how they do it [Electronic resource]. – Available at: <https://www.nationalgeographic.com/science/2019/08/volcanoes-blow-smoke-rings-now-we-know-how/>.
16. Ottersten H. Atmospheric structure and radar backscattering in clear air / H. Ottersten // *Radio Science*. – 1969. – № 12(4). – P. 1179-1193. <https://doi.org/10.1029/RS004i012p01179>.
17. Barbaresco F. Radar monitoring of a wake vortex: electromagnetic reflection of wake turbulence in clear air / F. Barbaresco, U. Meier // *Comptes Rendus Physique*. – 2010. – № 1(11). – P. 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2010.01.001>.
18. Shariff K. Analysis of the radar reflectivity of aircraft vortex wakes / K. Shariff, A. Wray // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2002. – № 463. – P. 121-161. <https://doi.org/10.1017/S0022112002008674>.
19. Martin W.J. Discrimination of bird and insect radar echoes in clear air using high-resolution radars / W.J. Martin, A. Shapiro // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2007. – № 24(7) – P. 1215-1230. <https://doi.org/10.1175/JTECH2038.1>.
20. Crispin J.W. Methods of Radar Cross-Section Analysis / J.W. Crispin, K.M. Siegel. – Cambridge: Academic Press, 1968. – 440 p.
21. Стручаев А.И. Связь кинематических и геометрических характеристик вихревых колец с параметрами генерирующего устройства при самоорганизации струйного течения / А.И. Стручаев // *Физика аэродисперсных систем*. – 2006. – № 43. – С. 106-119.
22. Стручаев А.И. Компьютерное моделирование переноса “пассивного” аэрозоля вихревыми кольцами по ЛДА-измерениям структуры / А.И. Стручаев // *Физика аэродисперсных систем*. – 2000. – № 37. – С. 46-52.
23. Бызова Н.Л. Турбулентность в пограничном слое атмосферы / Н.Л. Бызова, В.Н. Иванов, Е.К. Гаргер. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 263 с.
24. Тарасов В.Ф. Экспериментальные исследования переноса примеси турбулентным вихревым кольцом / В.Ф. Тарасов, В.И. Якушев // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1974. – № 1. – С. 130-136.

References

1. Putyata, V.Y. and Sidlyar, M.M. (1963), "Gidroaeromehanika" [*The hydroaeromechanics*], KU, Kyiv, 480 p.
2. Yusupaliyev, U., Shuteev, S.A., Vinke, E.E. and Yusupaliyev, P.U. (2010), Vortex rings and plasma toroidal vortices in a homogeneous infinite medium, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, No. 8(37), pp. 227-233. <https://doi.org/10.3103/S1068335610080014>.
3. Meleshko, V.V., Gourjii, A.A. and Krasnopolskaya, T.S. (2012), Vortex rings: history and state of the art, *Journal of Mathematical Sciences*, No. 6(187), pp. 772-808. <https://doi.org/10.1007/s10958-012-1100-0>.
4. Akhmetov, D.G. (2009), *Vortex rings*, Springer–Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 150 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05016-9>.
5. Yano, J.I. (2014), Basic convective element: bubble or plume? A historical review, *Atmospheric Chemistry and Physics*, No. 13(14), pp. 7019-7030. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7019-2014>.
6. Fukao, S. and Hamazu, K. (2014), *Radar for meteorological and atmospheric observations*, Springer Japan, Tokyo, 556 p. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54334-3>.
7. Vulfson, A. and Borodin, O. (2016), "Sistema konvektivnykh termikov kak obobschjonnijj ansamblj brounovskih chastic" [System of convective thermals as a generalized ensemble of Brownian particles], *The successes of the physical sciences*, No. 2(186), pp. 113-124. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0186.201602a.0113>.
8. *Spectacular, incredible, amazing rarely seen smoke rings at Mt Etna*, available at: www.youtube.com/watch?v=VbV98Z0QP-k (accessed 19 January 2020).
9. Wood, R. (1971) "Vihrevye kolca" [Vortex rings], *Kvant*, No. 12, pp. 28-30.
10. Zharnikov, M., Kamrukov, A., Kozhevnikov, I., Kozlov, N. and Roslyakov, I. (2008), "Generaciya krupnomasshtabnykh izluchayushchikh vihvrevykh struktur pri tormozhenii impul'snykh plazmennyykh strujj v vozduhe" [Generation of large-scale radiating vortex structures during the deceleration of pulsed plasma jets in air], *Journal of Technical Physics*, No. 5(78), pp. 38-46.
11. George, K.L. (2000), *Vortex Ring Generator: Mechanical Engineering Design for 100-kpsi Operating Pressures*, available at: www.apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a372518.pdf.
12. Kuznecov, A. and Konopasov, N. (2015), "Meteotron" [*Meteotron*], VLSU, Vladimir, 232 p.
13. "Zagadochnoe chernoe kolco kruzhilo v nebe na severe Kazahstana" [A mysterious black ring circled in the sky in the north of Kazakhstan], available at: www.today.kz/news/zhizn/2015-04-04/610200-strannoe-chnoe-kolco-zafiksirovali-v-nebe-na-severe-kazahstana-video/ (accessed 19 January 2020).
14. "Chornoe kolco v nebe Kazahstana. Poselok Shortandy" [Black ring in the sky of Kazakhstan. The village of Shortand], available at: www.youtube.com/watch?v=VbV98Z0QP-k (accessed 19 January 2020).
15. *Volcanoes blow smoke rings. Now we know how they do it*, available at: www.nationalgeographic.com/science/2019/08/volcanoes-blow-smoke-rings-now-we-know-how/, (accessed 19 January 2020).
16. Ottersten, H. (1969), Atmospheric structure and radar backscattering in clear air, *Radio Science*, No. 12(4), pp. 1179-1193. <https://doi.org/10.1029/RS004i012p01179>.
17. Barbaresco, F. and Meier, U. (2010), Radar monitoring of a wake vortex: electromagnetic reflection of wake turbulence in clear air, *Comptes Rendus Physique*, No. 1(11), pp. 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2010.01.001>.
18. Shariff, K. and Wray, A. (2002), Analysis of the radar reflectivity of aircraft vortex wakes, *Journal of Fluid Mechanics*, No. 463, pp. 121-161. <https://doi.org/10.1017/S0022112002008674>.
19. Martin, W.J. and Shapiro, A. (2007), Discrimination of bird and insect radar echoes in clear air using high-resolution radars, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, No. 7(24), pp. 1215-1230. <https://doi.org/10.1175/JTECH2038.1>.
20. Crispin, J.W.Jr. and Siegel, K.M. (1968), *Methods of Radar Cross-Section Analysis*, Academic Press, Cambridge, 440 p.
21. Struchaev, A. (2006), "Svyaz kinematicheskikh i geometricheskikh harakteristik vihvrevykh kolec s parametrami generiruyushchego ustrojstva pri samoorganizacii strujnogo techeniya" [Relation of kinematic and geometric characteristics of vortex rings with parameters of the generating device during self-organization of jet stream], *Physics of aerodisperse systems*, No. 43, pp. 106-119.
22. Struchaev, A. (2000), "Kompyuternoe modelirovanie perenosa "passivnogo" aehrozolya vihvrevymi kolcami po LDA-izmereniyam struktury" [Computer simulation of transfer of "passive" aerosol by vortex rings by LDA-structure measurements], *Physics of Aerodisperse Systems*, No. 37, pp. 46-52.
23. Byzova, N., Ivanov, V. and Garger, E. (1989), "Turbulentnost v pogranychnom sloe atmosfery" [*Turbulence in the boundary layer of the atmosphere*], Gidrometeoizdat, Leningrad, 263 p.
24. Tarasov, V. and Yakushev, V. (1974), "Eksperimental'nye issledovaniya perenosa primesi turbulentnym vihvrevym kolcom" [Experimental studies of impurity transfer by a turbulent vortex ring], *Applied mechanics and technical physics*. No. 1, pp. 130-136.

Надійшла до редколегії 06.02.2020

Схвалена до друку 10.03.2020

Відомості про автора:

Місайлов Віталій Леонідович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
докторант Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5307-5474>

Information about the author:

Vitalii Misailov

Candidate of Technical Sciences
Senior Research Postdoctoral Student
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5307-5474>

**СВОЙСТВА ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ КАК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ
НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ИХ СУЩЕСТВОВАНИЯ**

В.Л. Мисайлов

Вихревые кольца (тороидальные вихри) являются устойчивой формой движения в атмосфере. Также они являются предвестником или результатом опасных явлений, последствий которых можно избежать при условии своевременного обнаружения вихревых колец с помощью активных радиолокационных средств. Проведено моделирование и экспериментальное измерение скорости торможения вихревого кольца и потери вещества из его атмосферы в зависимости от пройденного пути. Для различных этапов существования вихревых колец экспериментально определена ширина спектра отраженного сигнала. Проведены расчеты эффективной площади рассеяния вихревых колец на начальном и конечном этапе их существования, где наиболее ярко выражены различия их формы и электрических свойств.

Ключевые слова: вихревое кольцо, радиолокационная цель, эффективная площадь рассеяния, скорость движения, ширина спектра.

**PROPERTIES OF VORTEX RINGS AS RADAR TARGETS
AT DIFFERENT STAGES OF THEIR LIFETIME**

V. Misailov

Vortex rings (toroidal vortices) are a stable form of motion in the atmosphere. They are also an indicator or result of dangerous phenomena, the consequences of which can be avoided providing on-time detection of vortex rings by means of active radar. The purpose of the article is vortex rings model development and evaluation of their properties as radar targets at different stages of their lifetime. The vortex ring (VR) consists of a core and an atmosphere. The atmosphere of the VR is an ellipsoid of rotation, which is slightly compressed by the direction of its motion. As the trajectory moves, the vortex ring velocity decreases nonlinearly and at a distance of 60 initial radii is $\approx 10\%$ of the initial volume. The experimental data obtained by the author as to the VR diffusion by a distance are broadly in agreement with the theoretical calculations. At the initial stage of their life, VRs in the air have a homogeneous atmosphere with a large amount of matter from which it is formed. While moving, this substance goes into the VR trace, so ultimately it remains only in the core of the vortex ring. The experimental data on the change of the substance concentration in the VR atmosphere during its motion are in general agreement with the theoretical calculations. The decrease in the concentration of the substance in the atmosphere of the VR over time and the practical constancy of the concentration of the substance in the kernel determine the variants of the forms and electrical characteristics of the vortex ring, which in turn determine its reflective properties. The experimentally obtained spectra of the signals reflected from the VR at different stages of their lifetime are very narrow. Their half-power bandwidth is unity hertz. With the use of program Altair Feko, the radar cross-sections (RCS) of the vortex rings were calculated at different stages of their lifetime. For the initial stage of lifetime (VR is a homogeneous ellipsoid of rotation), the calculated RCS VR charts are oscillating, which is explained by the change in electrical dimensions equivalent to the intersection of the dielectric ellipsoid with the change in the feed angle. With the increase of the relative dielectric constant of the substance, the VR RCS also increases. For the final stage of existence of the VR (the filler is only in the core), the RCS diagram is more dissected than the initial one. This is explained by the interference of the reflected waves due to the appearance of two dominant reflectors in the form of circular cross-sections of the torus-shaped core. Also, the total RCS level of the VR is approximately 10 dB less than the initial level, which is explained by the decrease in the amount of matter in the VR atmosphere over time.

Keywords: vortex ring, radar target, radar cross-section, speed, bandwidth.