

УДК 621.396.96

Ю.А. Авер'янова, к.т.н., доц.

А.О. Аверьянов, к.т.н., доц.

## ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ В ДОКРИТИЧНОМУ РЕЖИМІ ОБОРОТНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ РІДКИХ ГІДРОМЕТЕОРІВ

Національний авіаційний університет

E-mail: Yuliya\_ans@yahoo.co.uk

*Виконано аналіз дії внутрішніх сил натягування та зовнішніх сил атмосферних процесів, що призводять до деформації та вібрації рідких гідрометеорів. Одержано вираз, який дозволяє визначити розподіл енергії відбитого від гідрометеорів радіолокаційного сигналу між ортогональними антенами доплерівсько-поляриметричного радіолокатора. Зроблено обґрунтування граничних значень змін півосей краплі-сфероїда за рахунок впливу атмосферних динамічних процесів.*

**Ключові слова:** гідрометеор, метеорологічний радіолокатор, молекулярні сили поверхневого натягування, поляриметрія, турбулентність.

### Постановка проблеми

Виявлення небезпечних атмосферних явищ є пріоритетним питанням для багатьох галузей діяльності людини, таких, як прогнозування погоди, сільське господарство, авіація та багато інших.

За останні десятиріччя в період розвитку радіолокаційної метеорології значний прогрес був досягнутий у вирішенні питань, пов'язаних з погодними та атмосферними спостереженнями, виявленням небезпечних метеорологічних явищ тощо [1].

На сьогодні для метеорологічних цілей використовуються системи, які працюють у різних діапазонах (звукові, радіолокаційні, лізерні), і такі, що є чутливими до різних характеристик електромагнітних хвиль (доплерівські та поляриметричні системи) [2; 3].

У сучасних радіолокаційних системах поляриметрію використовують переважно для ідентифікації мікроструктури атмосферних утворень і оперують сучасні системи в більшості випадків з осередненими даними. При такому підході губиться інформація про деякі властивості та характеристики об'єктів, що досліджуються, наприклад, про їх вібрацію.

У роботі [4] розглянуто можливість використання поляриметрії для одержання інформації про вітрові атмосферні явища.

Підхід, що дозволяє оцінити вітрові явища за допомогою поляриметрії, є досить новим.

Отже, доцільно розробити шкалу для оцінки значень інтенсивності турбулентності за допомогою поляризаційних характеристик електромагнітних хвиль.

**Мета роботи** – обґрунтування параметрів, які необхідно знати для розрахунку шкали для оцінки значень інтенсивності турбулентності за допомогою поляризаційних характеристик електромагнітних хвиль та розрахунок їх граничних значень.

### Аналіз досліджень і публікацій

У роботах [5; 6] наведено підхід, який дозволяє оцінити інтенсивність турбулентності за допомогою однієї приймально-передавальної антени.

У роботах [7; 8] розглянуто новий підхід оцінки вітрових атмосферних явищ за допомогою поляриметричної радіолокаційної системи.

У зазначених роботах уведено концепцію поляризаційного спектра, що визначається як розподіл відбитої енергії електромагнітної хвилі за поляризаційними компонентами. У такому випадку відбита енергія може оцінюватися за допомогою декількох приймальних антен, антеною з фазовою решіткою або MISO, SIMO чи MIMO системами [9].

У роботі [6] наведено результати математичного моделювання за алгоритмом класифікації турбулентності за статистичними оцінками поляризаційних характеристик відбитої від метеорологічного об'єкта електромагнітної хвилі.

### Рідкі гідрометеори як об'єкти нестабільної форми

У випадку, коли рідка частиночка Лагранжа збільшується впродовж трьох координатних осей під дією зовнішнього впливу, використовуються рівняння Нав'є–Стокса. Також потрібно врахувати експериментально відомий факт стискування частиночки в напрямку дії зовнішньої сили [10].

Стискування компенсується витягуванням частиночки в напрямках, що є ортогональними до напрямку прикладення зовнішньої сили.

Розподіл тиску, що є нормальним до поверхні краплі, яка знаходиться в потоці повітря, показано на рис. 1 [10].

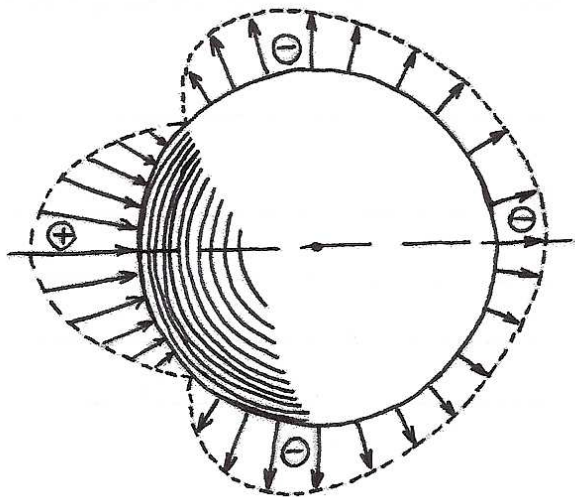


Рис. 1. Розподіл тиску по поверхні краплі

Знак «+» відповідає зоні високого тиску, знак «-» відповідає зоні низького тиску порівняно з атмосферним і статичним тиском всередині краплі.

Аеродинамічні сили сприяють сплюсненню краплі та її витягуванню. Отже, зручною моделлю краплі є сфероїд.

Різниця поверхневого тиску краплі веде до появи внутрішніх токів рідини, які перемищуються з зони високого тиску до зони низького тиску і викликають появу вихрових токів усередині краплі.

Отже, крапля в потоці повітря постійно вібрає і може розглядатися як об'єкт з нестійкою або нестабільною формою.

Вібрації краплі виявляються у флуктуаціях осей краплі-сфероїда і відображають важливу інформацію про поведінку, структуру та характеристики вібрувального об'єкта.

Характер флуктуацій обумовлений як характеристиками самого об'єкта, так і його взаємодією з оточуючим середовищем. Деякими з факторів середовища можуть бути динамічні атмосферні явища – вітер, турбулентність тощо.

Деформація краплі за рахунок дії аеродинамічних сил може бути поділена на лінійну та кутову.

Лінійна деформація веде до зміни лінійних розмірів краплі вздовж координатних осей.

Кутова деформація виявляється як зміна просторової орієнтації краплі та в її обертанні.

Таким чином, форма та параметри форми краплі не є фіксованими характеристиками, і їх можна розглядати як випадкові характеристики [11].

Вплив вітру та інших динамічних атмосферних явищ на випадковий процес вібрації краплі може виявлятися як зміна частоти, поляризації або амплітуди відбитої електромагнітної хвилі.

### Розрахунок швидкості деформації рідких гідрометеорів

Розглянемо лінійну деформацію рідкої частиночки. Лінійну деформацію частиночки Лагранжа як деформацію осей паралелепіпеда показано на рис. 2.

Із рис. 2 видно, що  $dx$  це відстань між точками  $a$  та  $d$ . Швидкість руху точок  $a$  та  $d$  можна визначити за виразом

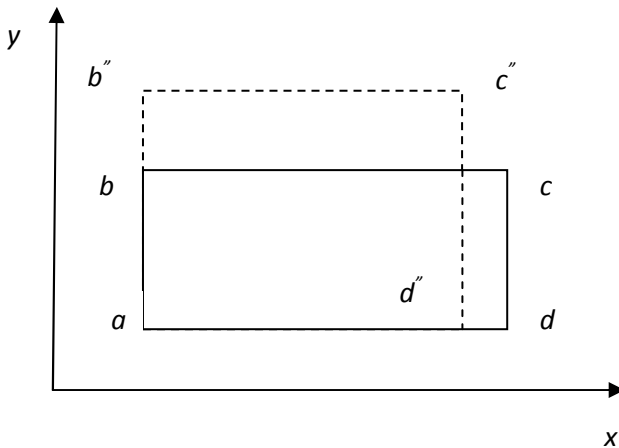


Рис. 2. Лінійна деформація граней паралелепіпеда, що репрезентує рідку частининокку Лагранжа

$$(U - \frac{dU}{dx} dx) - U = \frac{dU}{dx} dx ,$$

де  $U$  – швидкість частининокки впродовж осі  $x$ .

Під дією зовнішніх сил частининокка стискується і стає коротше за час  $dt$ .

Зменшення частининокки описується виразом

$$dd'' = \frac{dU}{dx} dx dt .$$

Відносне зменшення частининокки впродовж осі  $x$  дорівнює

$$\frac{dd''}{ad} = - \frac{dU}{dx} dt .$$

Швидкість стиснення краплі впродовж осі  $x$  дорівнює:

$$\epsilon_x = - \frac{dU}{dx}$$

або

$$-\epsilon_x = \frac{dU}{dx} .$$

Швидкість відносного витягування частининокки впродовж інших осей дорівнює:

$$\epsilon_y = \frac{dU}{dy} ;$$

$$\epsilon_z = \frac{dU}{dz} .$$

Знак « $\leftarrow$ » відповідає зменшенню частининокки-краплі в напрямку, що є протилежним до позитивного напрямку осі  $x$ .

Зміна граней паралелепіпеда (рис. 2) може привести до зміни об'єму краплі за рахунок лінійної деформації.

Повну швидкість трансформації рідкої краплі можна одержати, якщо підсумувати значення швидкостей зміни об'єму впродовж всіх осей:

$$\frac{dU}{dt} = - \frac{dU}{dx} dx dy dz + \frac{dV}{dy} dy dz dx + \frac{dW}{dz} dz dx dy = (-\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) dx dy dz , \quad (1)$$

де  $\frac{dV}{dy}$  – швидкість збільшення (витягування) краплі впродовж осі  $y$ ;

$\frac{dW}{dz}$  – швидкість збільшення (витягування) краплі впродовж осі  $z$ .

Поділив вираз (1) на первісний об'єм краплі:

$$V = dx dy dz ,$$

одержимо вираз для розрахунку швидкості відносної зміни об'єму краплі:

$$\frac{dV}{dt} : V = -\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z .$$

У випадку нетисливої рідини

$$\frac{dV}{dt} = 0$$

та  $V = \text{const}$ .

Вираз для розрахунку швидкості відносної зміни об'єму краплі має вигляд:

$$-\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$$

$$\text{або } \epsilon_x = \epsilon_y + \epsilon_z . \quad (2)$$

Сили поверхневого натягування краплі протидіють процесу деформації краплі під дією швидкісного напору.

Таким чином, результуюча деформація краплі буде визначатися співвідношенням між тиском швидкісного напору

$$P_{\Pi} = \frac{mV_2}{2} ,$$

та молекулярними силами додаткового поверхневого натягу

$$P_p = \frac{4\sigma}{R} ,$$

де  $m$  – це маса краплі;

$V$  – швидкість потоку, що набігає;  
 $\sigma$  – поверхневий натяг плоскої поверхні води;

$R$  – радіус краплі-кулі.

Сили поверхневого натягу намагаються повернути форму краплі до кулеподібної. Таке співвідношення відображає результат взаємодії цих сил та називається числом Вебера [12].

Крапля зберігає форму, подібну до еліпсу при числі Вебера від 0 до 10. Це є докритичний режим, за яким крапля деформується, але зберігає свою цілісність.

Такий режим можна назвати режимом оборотної деформації. У цьому режимі спостерігається вібрація краплі зі змінами значень півосей краплі-сфероїда залежно від зміни швидкісного напору.

У режимі оборотної деформації коливання крапель різного розміру відбуваються відповідно до частоти, що визначається сталою краплею [13].

При критичному значенні числа Вебера, що дорівнює 10, спостерігається розпад (роздвоєння) краплі. При значеннях, більших за 10, крапля поділяється на більшу кількість маленьких частинок.

Число Вебера можна використовувати для розрахунку граничних значень змін осей краплі-сфероїда, на яку діє потік повітря, що набігає.

Граничні значення змін осей краплі-сфероїда необхідно знати для розрахунку шкали для оцінки значень інтенсивності турбулентності за допомогою поляризаційних характеристик електромагнітних хвиль.

### **Обґрунтування граничних значень змін півосей краплі-сфероїда**

Для розрахунку граничних значень змін півосей краплі-сфероїда скористуємося енергетичним підходом.

При критичному значенні числа Вебера крапля роздвоюється. За законом збереження енергії в критичний момент роздвоєння краплі кінетична енергія динамічного напору дорівнює потенційній енергії поверхневого натягування двох новосформованих крапель.

Центри нових куль-крапель відповідають фокусам деформованого еліпса початкової кулеподібної краплі.

З урахуванням закону нерозривності потоку рідини об'єм нової з двох крапель дорівнює півоб'єму попередньої краплі-сфероїда.

Радіуси нових крапель дорівнюють значенню меншої півосі деформованої краплі-еліпса.

Відповідно до виразу (2) радіус більших півосей збільшується відносно зменшення меншої півосі краплі-сфероїда.

У момент роздвоєння краплі ортогональні складові відбитого радіолокаційного сигналу зрівнюються. Їх відношення будуть дорівнювати одиниці.

Енергетичний розподіл за складовими поляризаційного спектра [13] також змінюється – з'являються два компоненти, що відповідають краплям меншого розміру.

Розмір початкової краплі можна визначити, враховуючи той факт, що число Вебера є комплексом чотирьох параметрів.

Отже, один зі змінних параметрів можна визначити, якщо є значення діаметрів крапель в границях заданого числа Вебера від 0 до 10, що відповідає режиму оборотної деформації.

Верхня границя шкали для оцінки значень інтенсивності турбулентності в такому випадку дорівнює діаметру початкової краплі-кулі. Нижня границя дорівнює діаметру однієї з крапель, що виникли в результаті роздвоєння початкової краплі-кулі при її деформації.

### **Висновки**

Проаналізовано сили та атмосферні процеси, що призводять до деформації та вібрації рідких гідрометорів.

Одержано вираз, який дозволяє визначити розподіл енергії відбитого від гідрометорів радіолокаційного сигналу між ортогональними антенами доплерівсько-поляриметричного радіолокатора. Одержаний вираз може використовуватись як базовий для розробки шкали оцінки значень інтенсивності турбулентності за допомогою нового поляриметричного підходу.

Обґрунтовано параметри, які необхідно знати для розрахунку шкали оцінки значень інтенсивності турбулентності за допомогою поляризаційних характеристик електромагнітних хвиль, та розрахунків їх граничних значень.

### Література

1. *Doviak, R.J.; Zrnic, D.S.* 1993. Doppler radar and weather observations. – Academic Press, inc. – 522 p.
2. *Russchenberg, H.W.J.* 1992. Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar. – Delft University Press. – 206 p.
3. *Yanovsky, F.J.; Unal, C.M.H.; Russchenberg, H.W.J.* 2003. Doppler-Polarimetric Radar Observations of Turbulence in Rain Report: IRCTR-S-006-03 (September 2002 – March 2003), TU-Delft, The Netherlands. – 102 p.
4. *Averyanova, Yu. A.* 2004. Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization. – Proc. of the European Microwave Week, Amsterdam, The Netherlands, October: 29-32.
5. *Averyanova, Yu. A.; Averyanov, A. A.; Yanovsky, F.J.* 2010. Influence of Turbulence onto Depolarization of Signal Reflected from Hydrometeor. – Proc. of International Radar Symposium (IRS 2010), Vilnius. – 501–504.
6. *Averyanova, Yu. A.; Averyanov, A. A.; Yanovsky, F.J.* 2010. “Turbulence Intensity Classification Based on Estimating Statistical Polarimetric Parameters of Radar Reflections from Rain. – Proc. of International Conference on Statistical Methods of Signal and Data Processing, Kiev, Ukraine, October: 95–98.
7. *Averyanova, Yu. A.; Averyanov, A. A.; Yanovsky, F.J.* 2009. Polarization Selective Antennas for Reflected Wave Depolarization Determination. – Proc. of International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT 2009), Lviv, Ukraine, October: 256–258.
8. *Averyanova, Yu. A.; Averyanov, A. A.; Yanovsky, F.J.* Polarization signal components estimate in weather radar. – Proc. of 12th International Conf. on Mathematical methods in electromagnetic theory, Odesa, Ukraine: 360–362.
9. *Salz, J.* 1985. Digital transmission over cross-coupled linear channels. – AT&T Technical Journal. Vol. 64. N 6. July–August: 1147–1159,
10. *Вольнський М.С.* Необыкновенная жизнь обыкновенной капли / М.С. Вольнський. – М.: Знание, 1986. – 144 с.
11. *Авер'янова Ю.А.* Оцінювання ступеня деполаризації відбитих від гідрометеорів радіохвиль амплітудним методом / Ю.А. Авер'янова, А.О. Аверьянов, Ф.Й. Яновський // Вісник НАУ. – 2010. – № 1. – С. 100–104.
12. *Авер'янова Ю.А.* Можливості використання поляриметричних радіолокаційних параметрів для визначення характеристик вітру / Ю.А. Авер'янова, А.О. Аверьянов, Ф.Й. Яновський // Вісник НАУ. – 2005. – № 4. – С. 34–39.
13. *Averyanova, Yu. A.; Averyanov, A. A.; Yanovsky, F.J.* 2008. Polarization signal components estimate in weather radar // Proceedings of 12th International Conference on Mathematical methods in electromagnetic theory, Odesa, Ukraine: 360–362.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2011.