

Клапченко Василь Іванович

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики,

<https://orcid.org/0000-0002-4093-5500>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Кузнецова Ірина Олександрівна

Асистент кафедри фізики,

<https://orcid.org/0000-0003-1800-1733>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

АЛГОРИТМ РОЗВИТКУ УПОРЯДКОВАНИХ ВИХРОВИХ РУХІВ В АТМОСФЕРІ

Анотація. Пропонована робота є продовженням попередніх робіт авторів, присвячених застосуванню запропонованих фрагментованої фізичної статистики й універсального механізму хвильової далекодії (УМХД) в системах тотожних частинок. У роботі розглянуто сценарій № 2 – умовно необмежені системи із сумішшю кількох типів тотожних частинок, які мають обертальні степені вільності руху. Природною моделлю таких систем є атмосферні вихори (торнадо). У роботі цю модель розглянуто як базову. Технічними пристроями, які відтворюють такий сценарій, є вихрова труба Ранка – Хілша. Вона взята за допоміжну (або експериментальну) модель. Для базової моделі визначені необхідні макроскопічні умови, за яких статистична ймовірність появи торнадо перевищує 50%. За таких умов, застосувавши весь арсенал УМХД, розглянуто етапи самозародження і розвитку торнадо. Зокрема прояснено механізм самопідсилення і самоорганізації колового руху в області формування торнадо, його форму, процес випадіння «хобота» торнадо, його непрозорість і теплові ефекти, які супроводжують його появу. Введено поняття хвильового налипання та хвильової конденсації як особливих напівквантових явищ в умовах застосовності класичної фізики. Проведено відповідні кількісні оцінки. Продемонстровано справедливість кількісних оцінок на основі аналізу результатів досліджень допоміжної (експериментальної) моделі – вихрової труби Ранка – Хілша. Зроблено головний висновок: теоретичною основою, яка повністю пояснює фізичну природу появи торнадо і всі його особливості, може бути УМХД.

Ключові слова: алгоритм самоупорядкування; вихрова труба; геометрія анізотропії; хвильовий кластер; хвильовий стрімер; хвильовий сендвіч; корпускулярний та хвильовий конденсат; хвильове налипання; хвильове квантування; релаксація хвильової взаємодії; торнадо

Вступ

Пропонована стаття є продовженням серії робіт, присвячених застосуванню фрагментованої фізичної статистики [1] і запропонованого універсального механізму хвильової далекодії (УМХД) [2] до молекулярних систем тотожних частинок. Зокрема такою була попередня робота [3], в якій розглянуто один з найпростіших сценаріїв розвитку процесів у молекулярних системах – формування газових потоків в обмежених системах (сценарій № 3 за класифікацією статті [2]). У нинішній роботі поставлено за мету розглянути сценарій № 2 – умовно необмежені молекулярні системи із сумішшю кількох типів тотожних частинок, які мають обертальні степені вільності руху.

Про вибір моделі, яка відповідала б вказаному сценарію, слід зазначити так: «умовна необмеженість систем» відразу накладає обмеження

на вибір прообразу теоретичної моделі для розгляду, оскільки відсутність обмежувальних стінок в земних умовах характерна лише для атмосферних молекулярних явищ. У лінійці атмосферних явищ чи не найскладнішим для описання і розуміння є процес зародження та розвитку торнадо (інші назви – смерчі, тромби) [4].

Про це явище написано багато, зокрема [4–7]. Маючи на меті перевірку застосовності УМХД для пояснення і кількісного описання такого типу явищ, ми обрали модель торнадо за базову, тим більше, що вона має технічний аналог, своєрідну експериментальну модель, яка була б допоміжною моделлю в цьому розгляді.

Такою експериментальною моделлю є технічний пристрій, запатентований ще у 1934 р. французьким інженером Ранком – вихрова труба Ранка – Хілша [9]. Цей пристрій має цілу низку практичних застосувань [9–11], і дослідження не

припиняються до цих пір [12; 13]. Але і дотепер всіх дивує здатність вихрової труби до розділення потоку газу на холодний та гарячий, яка не має теоретичного пояснення. Проте наявний масив експериментальних досліджень є достатнім для кількісних оцінок теоретичних моделей.

Мета статті

Метою роботи є обґрунтування застосовності УМХД для якісного описання і пояснення явищ, які супроводжують процес самозародження та розвитку вихрових атмосферних рухів. Передусім йдеться про явище зародження торнадо, його властивості та особливі ефекти, які супроводжують процес. По-друге, підтвердити здатність УМХД до отримання кількісних оцінок та їх перевірки на основі даних дослідження аналогічних експериментальних моделей.

Постановка проблеми

Базова модель

Макроскопічні передумови торнадо.

Абстрагуючись від надмірної інформації та екзотичних випадків в історії спостереження явища торнадо, наведемо усереднені, статистично важливі факти [4–8], що передують появі торнадо. Це так звані макроскопічні передумови, які необхідні, щоб з певною ймовірністю торнадо з'явилося.

1. Насамперед слід погодитися з тим, що географічні області появи торнадо здебільшого розташовані на лініях перетину двох атмосферних фронтів: холодного та сухого з теплою та насиченою вологою. При цьому, як при будь-якому нецентральному зіткненні тіл, виникає низка квазітвердих утворень (цифра 1 на рис. 1), що мають некомпенсовані як імпульс \vec{P}_z , так і момент імпульсу \vec{L}_z . Подібні повітряно-паро-крапельні (ППК) утворення часто іменують *тромбом* або *ковадлом* (за схожістю форми). У цій статті будемо називати їх аббревіатурою ППК.

Часто [5–7] акцентують увагу на тому, що в північній півкулі напрямом обертання ППК відбувається проти годинникової стрілки і, посиляючись на сили Коріоліса [14], долучають це до важливих факторів впливу на процес зародження торнадо. Вважаємо таке уявлення правильним лише частково – при такій орієнтації некомпенсований момент імпульсу ППК \vec{L}_z завжди більший. Це стається тому, що обидва протяжні атмосферні фронти мають переважний напрям обертання проти годинникової стрілки завдяки тим самим силам Коріоліса.

2. До важливих фактів слід долучити спостереження про те, що випадки торнадо реалізуються виключно в світлу пору дня. З цього

факту випливає логічний висновок про важливу роль висхідних потоків (лінії 2 на рис. 1), які дійсно потребують інтенсивного прогрівання земної поверхні та випаровування вологи. Лише не варто приписувати їм невластиві функції – розкручування торнадо за рахунок сил Коріоліса. Як це впливає з [14], сили Коріоліса хіба що підтримують незмінним некомпенсований момент імпульсу всього ППК, а от при малих просторових розмірах торнадо по горизонталі (1-2 км) не відіграють ніякої ролі.

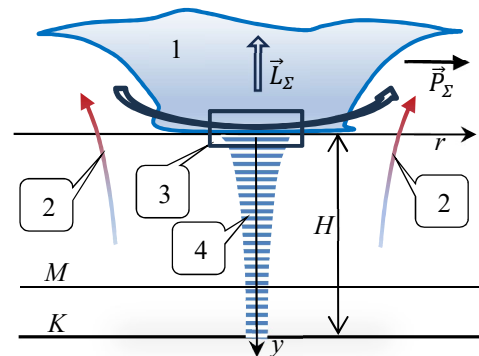


Рисунок 1 – Базова модель – процес самозародження торнадо: 1 – ППК; 2 – висхідні потоки; 3 – центральна область ППК (зона формування торнадо або система в русі – упорядкований хаос); 4 – тіло торнадо («хобот»)

Отже, наявність висхідних потоків дуже важлива для затримки в завислому стані ППК утворень. Тому що без них грозове утворення ППК за короткий час опустилося би на землю у вигляді потужної грози. Жодних катастрофічних наслідків при цьому для наземних будівель та рослинності не було б.

3. Ми відкинули як неважливі для моделі виникнення торнадо всі процеси, пов'язані з різницею температур та вологості тих мас атмосферних фронтів, які потрапляють в тіло ППК при їх перетині. Тому що взагалі не пов'язуємо появу торнадо з кількістю водяних парів та їхнім агрегатним станом. Але акцентуємо увагу на тому, що ППК є сумішшю тотожних частинок трьох типів: N_2 (~78%), O_2 (~17%), H_2O (до 5%). Як видно, переважним типом частинок є азот. Тому нашу базову модель ми звели до моделі лише з одним типом тотожних частинок – молекул азоту.

4. Серед кількісних характеристик, отриманих в гонитві за випадками формування торнадо, виокремимо одну, яку слід врахувати в моделі. Це тангенціальна швидкість потоків u_0 в площині координати $y = 0$ зони формування торнадо (цифра 3 на рис. 1). При величинах $u_0 > 33$ м/с ймовірність його появи стає високою (понад 30%). Власне тому в базовій моделі ми розглядали швидкість $u_0 = 40$ м/с як таку, за якої ймовірність зародження торнадо стає високою.

Отже, абстрагуючись від надлишку деталей, для нашої базової моделі визначено найголовніші необхідні макроумови для зародження торнадо:

- поява квазітвердого утворення ППК з великим некомпенсованим моментом імпульсу \vec{L}_Σ ;
- наявність висхідних потоків та некомпенсованого імпульсу \vec{P}_Σ самого ППК, які забезпечили б довге перебування ППК в підвішеному стані (характерний час $\tau \sim 10^4$ с). Якраз для цього необхідне постійне переміщення ППК над новими областями нагрітої земної поверхні.

Якщо за цих макроумов в центральній частині ППК (прямокутна область 3 на рис. 1) буде сформовано коловий рух у горизонтальній площині з дотичною швидкістю $u_0 \sim 40$ м/с, то це означатиме високу ймовірність виникнення торнадо. Власне досягнення величини цього параметра ми розглядаємо як першу достатню умову зародження торнадо.

Формулюванням цих передумов окреслено проблему, яку маємо на меті вирішити в цій роботі. Суть її – дати пояснення: як, чому і за допомогою яких механізмів за вказаних умов виникає торнадо.

Допоміжна модель

Для підтвердження правильності нашого тлумачення фізичної суті явищ самоупорядкування в молекулярних потоках ми мали змогу користуватися результатами експериментів з вихровою трубою Ранка – Хілша, яку тут пропонуємо як допоміжну модель (рис. 2).

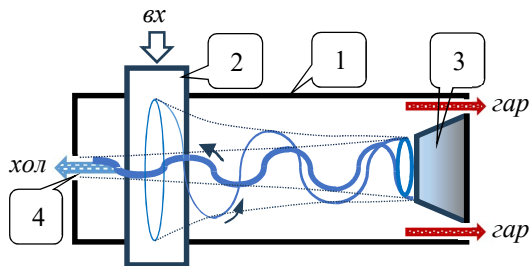


Рисунок 2 – Допоміжна модель – вихрова труба Ранка – Хілша: 1 – труба; 2 – равік для тангенціального вводу газу; 3 – клапан гарячого виходу (заглушка центральної частини); 4 – отвір холодного виходу газу

Вона являє собою простий пристрій, подробиці і деталі функціонування якого легко віднайти в літературі [9–11]. Ми додали в цю модель лише серію синіх ліній, щоб підкреслити її схожість з базовою моделлю торнадо.

Найбільш загадковою властивістю вихрової труби вважають її здатність до розділення завихреного потоку газу на два – холодний та гарячий. Якраз для аналізу цієї властивості завихрених потоків ми залучили цю модель до розгляду.

Виклад основного матеріалу Арсенал УМХД

Необхідність в узагальненнях та виокремленні особливостей. У цій роботі до УМХД будемо звертатись часто та використовувати його в повному обсязі. Як засвідчив попередній аналіз, спектр явищ, де виникає необхідність застосування УМХД, неймовірно широкий, а тому постає необхідність в узагальненні наших знань про цей механізм порівняно з первинними уявленнями та поняттями, викладеними в роботі [2]. Тим більше, що в застосуванні до необмежених систем тотожних частинок проявляється низка його особливостей.

Почнемо з того, що область застосовності УМХД починається там, де системи тотожних частинок перестають бути ізотропним хаосом і переходять в стан *упорядкованого хаосу*. Тому іноді такі системи можна позначати аббревіатурою УХ. Зрозуміло, що упорядкування в ізотропному хаосі виникає при внесенні в цю систему направленої імпульсу \vec{p}_n (у випадку обертального руху – момента імпульсу \vec{L}_n). Тоді в загальному слід говорити про *приток анізотропії* $\vec{J}_{пр} = d\vec{p}_n/dt$ (чи $\vec{J}_{пр} = d\vec{L}_n/dt$) в систему. Аналогічно, якщо існує винос за межі системи направленої імпульсу (чи момента імпульсу), то його будемо позначати як *виток анізотропії* $\vec{J}_{вит}$.

Тоді тіло чи пристрій, які вносять анізотропію в систему називатимемо *джерелом анізотропії*. Надалі виникає своєрідний термінологічний ланцюжок: *перенос анізотропії, геометрія анізотропії, ступінь анізотропії* тощо. Ці терміни загалом зрозумілі, але потребують уточнення, що будуть зроблені нижче.

Крім того, селективний характер УМХД вносить ще один термінологічний ланцюжок зі словом «упорядкування». Зокрема це вже названий *упорядкований хаос, упорядкування в поступальних ступенях руху, упорядкування в обертальних ступенях* і т.п. Прояснення суті цих термів далі по тексту.

Найбільший термінологічний ланцюжок виникає зі словом «хвильовий». Починається він з *хвильових представлень молекул, хвильових пар, хвильових локальних кластерів, хвильових стрімерів, хвильових сендвічів* і аж до *хвильового налипання, хвильового конденсату та хвильового квантування*. Термінологія вимагає точності та ясного розуміння, що неможливо без узагальненого погляду на УМХД, яке ми пропонуємо у вигляді його блок-схеми.

Стадії або цикли УМХД. На рис. 3 наведено блок-схему активних стадій УМХД. Тут ми пропускаємо початкову стадію зародження хвильових пар, описану в [2], та виокремлюємо лише три активних стадії (або цикли) функціонування

УМХД. На блок-схемі рис. 3 вони винесені за межі джерела анізотропії та самої системи частинок, яка на схемі позначена як упорядкований хаос.

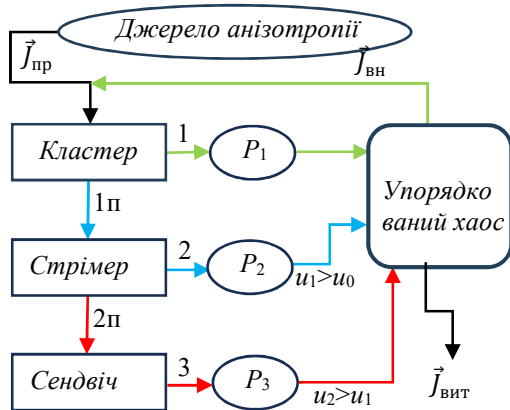


Рисунок 3 – Блок-схема активних стадій універсального механізму хвильової далекодії (УМХД): кластер – поява хвильових пар та хвильових локальних кластерів; стрімер – поява неперервно-дискретних хвильових стрімерів; сендвіч – стадія стійких хвильових структур

1. Стадія кластерів, або зелений цикл. Це стадія хвильових локальних кластерів, тобто швидка поява хвильових пар (груп пар) та їх розпаду. Своєрідний цикл підтримки упорядкованого руху молекулярної системи (підтримка упорядкованого хаосу). Характерний час – наносекунди. На цій стадії будь-які додаткові упорядкування відсутні.

Ця стадія завжди завершає будь-який більш організований цикл.

2. Стадія стрімерів, або синій цикл. Стадія хвильових стрімерів, тобто розгалужених, більш тривалих та протяжних неперервно-дискретних хвильових утворень. Час існування – від долей мілісекунди до секунд. Має пороговий характер та селективну здатність до упорядкування хвильових пар за величиною швидкості і заселеністю обертальних степенів вільності. Упорядкування зростають пропорційно часу існування.

Це стадія тимчасової хвильової конденсації.

3. Стадія сендвічів, або червоний цикл. Стадія утворення неперервних хвильових утворень – хвильових сендвічів – відповідно до геометрії анізотропії. Її можна називати стадією глибокої хвильової конденсації, аналогічній бозе-конденсації в квантових системах [15]. Термін хвильова конденсація є ширший, оскільки, на відміну від [15], передбачає не тільки рівність модулів імпульсу, але і їхню однакову орієнтацію. Це стадія хвильових утворень високої стабільності, обумовлених хвильовим квантуванням. Час існування $\sim 10^4$ с.

Відразу зробимо два зауваження. По-перше, циклічність стадій природна, тому що в УМХД закладено накопичувальний ефект, тобто разом з притоком анізотропії $\vec{J}_{пр}$ процеси в системі УХ підтримує раніше накопичена анізотропія у вигляді

внутрішнього потоку анізотропії $\vec{J}_{вн}$. По-друге, наявність на блок-схемі лише однієї чорної стрілки з витоком анізотропії $\vec{J}_{внт}$ розрізнятиме між собою блок-схеми для обмежених систем від систем необмежених. Наразі ми аналізуватимемо необмежену систему, тому в нашому випадку в схемі рис. 3 цю чорну стрілку слід вважати відсутньою, оскільки $\vec{J}_{внт} = 0$.

Замикання циклів та перехід між стадіями.

Стадії набувають характеру замкнутих циклів внаслідок того чи іншого релаксаційного процесу P_1 – P_3 . А от переходи між стадіями є пороговими і настають лише за певних умов. Зокрема типові причини релаксації означають таке.

P_1 . Релаксація в звичайному розумінні як перенесення направленої імпульсу від хвильових утворень в корпускулярний хаос за рахунок в'язкості. У випадку необмежених систем здійснює перерозподіл (перенесення анізотропії) між частинами системи. Для обмежених – здійснює виток анізотропії за межі системи.

P_2 . Розпад, руйнування хвильового стрімера. Причини: розрив зв'язності (порушення порогу протікання) або наявність дрібних неоднорідностей на шляху стрімера.

P_3 . Розпад, руйнування або старіння хвильового сендвіча. Причини: наявність суцільних перешкод чи деградації хвильового сендвіча.

Пороговий процес **1п** зводиться до нижченаведеного. Це перехід від стадії локальних кластерів до стадії хвильових стрімерів, який відбувається при досягненні певного ступеня анізотропії та виконанні умови проходження порогу протікання по хвильових представленнях.

Особливість порогу протікання в таких динамічних системах сформульована нами в [16] і виглядає так: наявність **неперервної зв'язності хвильових представлень як в просторі, так і в часі**. Ця обставина обумовлює селективність УМХД – приводить до упорядкувань за величиною швидкості хвильових представлень в околі найбільш імовірної швидкості $v_{ні} = c_0$ та обертальних степенів вільності молекул. Детальне описання цих селективних упорядкувань можна знайти в [2].

Пороговий перехід **2п** між стадіями стрімерів та хвильових сендвічів вимагає ще вищого ступеня анізотропії, збільшеного часу існування стрімера та, в окремих випадках, виконання умови геометричного замикання основного тіла стрімера. Зокрема для обертальних рухів у системі обов'язкове формування стрімера, замкнутого у вигляді кола. Остання порогова умова обумовлена геометрією анізотропії, інакше кажучи способом упорядкування механічного руху. Є лише два види таких упорядкувань: однонаправлений прямолінійний та коловий рухи. З огляду на це можливі всього три типи геометрій: лінійна, колова та спіральна.

Особливості УМХД в необмежених системах

Підкреслимо низку особливостей механізму з огляду на необхідність застосування його до поставленої перед нами проблеми зародження торнадо. Як випливає з базової моделі, це відбувається, фактично, в умовах необмежених молекулярних систем.

Спонтанне зростання орієнтаційної складової ентропії. Ще в роботі [1] ми звернули увагу на можливість спонтанного зростання орієнтаційної складової ентропії в необмежених системах. Зроблений з цього висновок зводився до того, що необмежені системи є нестійкими з точки зору самозародження направлених рухів, тобто є здатними до самоупорядкування.

Зміна погляду на в'язкість. Здебільшого, спираючись на досвід роботи з молекулярними системами, що мають обмеження, термін *в'язкість* сприймається нами як сили *в'язкого тертя*, оскільки в обмежених системах в'язкість не стільки механізм релаксації, скільки причина втрат енергії та імпульсу.

У необмежених системах *в'язкість* є лише явищем переносу імпульсу! Без витоку анізотропії за межі системи! Більше того, в'язкість, здебільшого, діє навпаки – організовує *приток анізотропії* в систему або здійснює перенос анізотропії між окремими частинами системи! Тобто вона відіграє роль не руйнівної, а рушійної сили. Зокрема у випадку базової моделі (рис. 1) квазітверде утворення ППК виникає завдяки появі краплин водяного конденсату та в'язкості.

Це означає, що для окресленої прямокутником на рис. 1 області 3, яку ми вважатимемо власне необмеженою системою (виділення умовне!) і яку розглядатимемо як область формування торнадо, весь навколишній об'єм ППК (1 на рис. 1) являтиме собою джерело анізотропії. За необхідності в цю область буде відбуватись приток анізотропії з периферійних прошарків ППК за допомогою в'язкості.

Здатність до підсилення та саморозгону.

Важливу специфіку необмежених систем породжує відсутність витоку анізотропії за їх межі $\vec{J}_{\text{вит}} = 0$. Зрозуміти її можна через зв'язок теоретичного параметра α (ступеня внесеної анізотропії) з мірою упорядкованого руху β молекулярної системи, яка виникне в результаті релаксації.

Ступінь анізотропії α :

$$\alpha = n_{\lambda}/n_0, \quad (1)$$

де n_{λ} – концентрація молекул, які одночасно перебувають у хвильовому представленні; n_0 – концентрація всіх молекул. Мірою упорядкованого руху є таке співвідношення:

$$\beta = u/c_0, \quad (2)$$

де u – середня швидкість упорядкованого руху молекул; $c_0 = \sqrt{2RT/\mu}$ – найбільш імовірна швидкість молекул. Для атмосферних явищ, де переважає азот, її величина $c_0 \cong 400$ м/с.

Є два крайніх випадки зв'язку між величинами α та β , які обумовлені способом внесення анізотропії в систему. При одномоментному (або *імпульсному*) способі $\alpha = \beta$. Але такі випадки екзотичні (наприклад, попадання метеорита в атмосферу). При накопичувальному (або *енергетичному*) способі:

$$\alpha = \beta^2 \quad (3)$$

при $\vec{J}_{\text{пр}} = \vec{J}_{\text{вит}}$.

Цей зв'язок притаманний широкому колу явищ [3], зокрема і для систем з обмеженнями. Крім того, такий зв'язок ґрунтується на балансі потоків анізотропії $\vec{J}_{\text{пр}}$ та $\vec{J}_{\text{вит}}$. Насамкінець, в роботі [3] ми продемонстрували, що зв'язок (3) приводить до рівняння Бернуллі [14].

Аналіз співвідношення (3) для необмежених систем, у яких $\vec{J}_{\text{вит}} = 0$, виокремлює два можливих режими їх функціонування. Перший і очевидний – це режим *підсилення*, якщо $\vec{J}_{\text{пр}} \neq 0$. Тобто навіть при надзвичайно малих притоках анізотропії невпинно зростають як n_{λ} , так і u . Другий при $\vec{J}_{\text{пр}} = 0$ призводить до нестабільного стану системи. Цей випадок називатимемо режимом *саморозгону*, тому що будь-яке перевищення швидкості потоку u в окремому прошарку системи (навіть флуктуаційне) проковує в цьому прошарку більшу ймовірність запуску УМХД (стадія *стрімерів*) з наступним ростом n_{λ} в ньому за рахунок залучення анізотропії із сусідніх прошарків системи. Тобто, розганяючи себе, гальмує інших.

Виявляється, що комбінацію цих двох режимів роботи УМХД в атмосферних явищах ми спостерігаємо на кожному кроці. Характерно, що завжди перенос та доставку анізотропії в систему виконує в'язкість. Зокрема це стосується і процесу зародження торнадо.

Зародження та розвиток торнадо

Підготовчий етап

Тепер безпосередньо аналізуватимемо базову модель (рис. 1). Відповідно до проведених попередніх узагальнень та розгляду особливостей необмежених систем, визначимось з конкретними елементами моделі. Зокрема утворений ППК (1 на рис. 1) являє собою величезне джерело анізотропії, оскільки є носієм некомпенсованого моменту імпульсу \vec{L}_{Σ} . Цей ППК здійснює обертальний рух, будучи зв'язаним в єдине ціле квазітверде тіло в'язкістю. Частиною ППК є наша необмежена система – центральна область ППК, окреслена прямокутником 3 на рис. 1. Підкреслимо ще раз, що таке окреслення – умовне, жодних обмежень на систему не накладає.

Зазначимо і те, що окреслена прямокутником 3 на рис. 1 область частково включає і вільну від

крапельних включень частину атмосфери, що є важливою умовою для функціонування УМХД. Зауважимо, що у всіх атмосферних явищах комбінований механізм «саморозгону-підсилення» ефективно працює саме на межі з повітряно-крапельним джерелом анізотропії.

Наївно думати, що в момент виникнення ППК в його центральній частині 3 (рис. 1) випадково виникне організований коловий рух, та ще й з такими значеннями тангенціальних швидкостей потоку, як $u_0 \sim 40$ м/с. Все це з'явиться лише в кінці підготовчого етапу і запорукою цьому є вказаний механізм «саморозгону-підсилення» та достатній час існування завислого стану ППК.

Власне якраз механізм «саморозгону-підсилення» вмикає ППК як джерело анізотропії, оскільки, збільшуючи швидкість в окремих прошарках окресленої системи 3 (рис. 1), він гальмує всі сусідні прошарки. І саме тому, намагаючись підтримати цілісність квазітвердого утворення ППК, в цю центральну область почне підводитись додатковий момент імпульсу ($\vec{J}_{пр} \neq 0$) від периферійних прошарків ППК. А це приведе до ефекту підсилення і буде повторюватися раз за разом.

Надалі слід зауважити, що механізм «саморозгону-підсилення» в необмежених системах не вмикається ніколи, тобто приток анізотропії буде існувати до тих пір, доки не вичерпається джерело анізотропії. Це важливо, тому що і на етапі торнадо цей потік буде конче необхідним.

Отже, коли і чим завершується підготовчий етап? За якісною ознакою – тоді, коли в центральній частині 3 рис. 1 буде сформований горизонтальний прошарок з чітким коловим рухом та тангенціальною швидкістю руху в ньому, що наближається до величини $u_0 \sim 40$ м/с. З точки зору УМХД, підготовчий етап закінчується тоді, коли виникають всі необхідні умови для подолання бар'єру 2π та переходу від стадії хвильових стрімерів до стадії хвильових сендвічів (рис. 4).

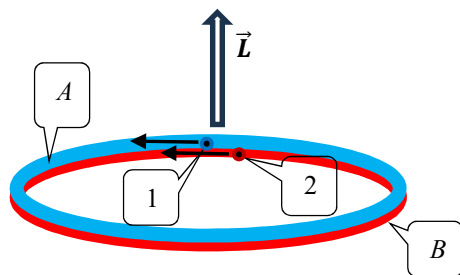


Рисунок 4 – Мінімальний хвильовий сендвіч з двох молекул (цифрами 1 та 2 позначено положення цих молекул в корпускулярному представленні та їх миттєві швидкості)

А видимим завершенням підготовчого етапу є початок випадіння «хобота» торнадо.

Етап торнадо

Стабільність хвильових сендвічів. Початок торнадо співпадає з початком продукування в області 3 (рис. 1) хвильових сендвічів, типовим представником яких є мінімальне подібне утворення, показане на рис. 4.

Такі хвильові сендвічі мають неймовірну для класичної фізики стабільність. Характерний час їхнього існування становить порядок 10^4 с. З одного боку, така поведінка зрозуміла, тому що подібні хвильові утворення не взаємодіють з окремими молекулами, що входять в склад хаотичної складової системи. Проте видається, що це неможливо без накладання на них певних квантових умов. Дійсно, такою умовою виступає хвильове квантування, яке можна записати так:

$$2\pi r_0 = j \cdot \lambda_{дБ}, \quad (4)$$

де r_0 – радіус сендвіча в площині $y = 0$, $\lambda_{дБ} = h/m \Delta v$ – довжина хвилі де Бройля молекули в сендвічі; Δv – різниця швидкостей сусідніх молекул у сендвічі; j – велике ціле число.

Ось після цієї умови маємо привід іменувати хвильовий сендвіч хвильовим конденсатом, натякаючи цим на квантову природу явища, аналогом якого є бозе-конденсат [15]. Відповідно сукупність хвильових сендвічів може називатись надтекучим компонентом газу. А явище торнадо тоді маємо право іменувати високотемпературним квантовим явищем, наприклад, високо-температурною надтекучістю.

І це незважаючи на те, що момент імпульсу сендвіча в області зародження $y = 0$ є виключно класичною величиною:

$$m n_{\lambda_0} c_0 r_0 = m \alpha_0 n_0 c_0 r_0 = L_0, \quad (5)$$

тому що на жодний з параметрів (m – маса молекули, c_0 – найбільш імовірна швидкість, $n_{\lambda_0} = \alpha_0 n_0$ – концентрація молекул, що належать сендвічу і т.п.) не накладається ніяких обмежень.

Хвильове налипання та седиментація. Подальша доля всіх хвильових сендвічів, які будуть зароджуватись в центральній області 3 (рис. 1) буде такою ж, як і для конденсату корпускулярного. Її визначатимуть два ефекти: седиментація в гравітаційному полі (осадження) та додаткова поверхнева конденсація. Домовимось лише про те, щоб додаткову поверхневу конденсацію замінити терміном хвильове налипання.

Хвильовий сендвіч – найбільш компактне хвильове утворення, і як конденсат в звичайному розумінні цього слова, може бути охарактеризованим густиною подібного утворення ρ_k , яка вища за середню густину газу ρ_r . Тобто при умові $\rho_k > \rho_r$ виштовхувальна сила Архімеда буде меншою за силу гравітаційного притягання, що обумовлює осадження конденсату.

Більше того, процеси хвильового налипання, які збільшують масу хвильового сендвіча в процесі його

седиментації, суттєво пришвидшують їх процес падіння. Ми не будемо вдаватися в деталі самого процесу налипання. Звернемо лише увагу на аналогію зі звичайними водяними краплинами (так звана корпускулярна конденсація), маса яких зростає за рахунок поверхневої конденсації з об'єму газу, насиченого водяною парою. Так і хвильовий конденсат також провокує хвильове налипання.

Сконцентруємо увагу на відмінності між поверхневою конденсацією та хвильовим налипанням. При хвильовому налипанні кожна з молекул перетворюється на такого ж хвильового собрата, як це показано на рис. 4. А для цього їй необхідно відібрати частину моменту імпульсу (5) від існуючого сендвіча. При цьому, можливо, окремі молекули здатні привнести і свою долю моменту імпульсу в існуючий сендвіч. Проте, для спрощення, ми цим знехтуємо.

Тому виходить, що процес седиментації хвильового сендвіча, ускладнений хвильовим налипанням, можна розглядати на основі закону збереження моменту імпульсу. І справедливим це буде до досягнення сендвічем точок, де зустрічаються перші найвищі перепони на поверхні землі. В цьому місці відбувається руйнування сендвічів та перехід до упорядкованого хаосу.

Тобто, вважаючи момент імпульсу сендвіча (5), отриманий при зародженні в точці $y = 0$, незмінним ($L_0 = const$) аж до досягнення сендвічем точки М, знайдемо зв'язок параметрів між цими точками:

$$m\alpha_0 n_0 c_0 r_0 = m\alpha_M n_0 c_0 r_M. \quad (6)$$

Звідки

$$\alpha_M = \alpha_0 \gamma, \quad (7)$$

де $\gamma = r_0/r_M$ – ступінь концентрації моменту імпульсу, орієнтовно дорівнює зменшенню радіуса сендвіча по відношенню до його початкового значення.

Тоді стає зрозумілою лійкоподібна структура стінок торнадо, як вона виникає і до чого призводить. Зокрема хвильова структура стінок робить їх непрозорими для оптичного діапазону, тож ми сприймаємо її як тіло торнадо. Крім того, зниження радіуса веде до зростання концентрації молекул в хвильовому представленні. А при цьому момент імпульсу сендвіча концентрується в стінках торнадо все меншого радіуса.

Але при цьому квантова умова (4) продовжує виконуватись! І відбувається це також квантовим чином, тобто стрибком. При зменшенні моменту імпульсу, що припадає на одну молекулу в сендвічі, стрибком змінюється ціле число j . Відповідно (також стрибком) змінюється і радіус кола сендвіча. Тобто радіус кола кожного окремого сендвіча проходить дискретний ряд значень r_j при переході від r_0 до r_M .

Торнадо на землі. Точніше, мова піде про нижню частину «хобота» торнадо між точками М та К (рис. 1). Це та область атмосфери поблизу земної поверхні, яка заповнена фізичними перешкодами (дерева, будівлі тощо).

Якраз завдяки цим перешкодам відбувається руйнування хвильових сендвічів та релаксація потоку до стану упорядкованого руху. І нам важливо визначитись, якими будуть швидкості упорядкованого руху стінок торнадо після релаксації в точці М.

Відповідно до співвідношень (2), (3) та (7), матимемо:

$$u_M = c_0 \cdot \beta_M = c_0 \cdot \sqrt{\gamma \alpha_0}, \quad (8)$$

де $\alpha_0 = \beta_0^2 = (u_0/c_0)^2 = 0,01$ – ступінь анізотропії в області зародження хвильових сендвічів $y = 0$. Звертаємо увагу, що в області зародження лише один відсоток молекул входить у хвильовий сендвіч, а швидкість потоку в цій області вже сягає значної величини – 40 м/с.

Якщо ж у процесі седиментації та налипання молекул радіус стінок торнадо зменшився, наприклад в 10 разів (тобто $\gamma = 10$), то відповідно до (8) поблизу землі швидкість упорядкованого руху в стінках торнадо сягатиме $u_M = c_0 \cdot \sqrt{\gamma \alpha_0} \cong 130$ м/с. А це вітри надзвичайної руйнівної сили. І вся руйнівна дія сконцентрована якраз в стінках торнадо. Тому хочеться повторити ще раз. Якби ППК випав звичайним дощем, навіть з початковим грозовим шквалом, від його великого моменту імпульсу не було б ніякої шкоди. Розподілений по великій площі поверхні землі цей момент імпульсу залишився б непоміченим. Аж раптом – торнадо – *квантовий концентратор моменту імпульсу!* І зовсім інші наслідки.

Руйнування і холод. Спостереження підтверджують не тільки той факт, що руйнування під час торнадо спостерігаються лише в зоні його стінок, тоді як в центральній зоні – повний штиль. Здебільшого дивує те, що в зоні стінок, де найбільші механічні руйнування, відчують різке зниження температури, що видається нелогічним. А насправді, це одна з важливих закономірностей УМХД. Селективність УМХД призводить до того, що молекули, які потрапили в хвильову компоненту газу, втрачають одну поступальну та всі обертальні степені вільності. Це обумовлює тепловий потік випромінювання з області формування хвильової компоненти, яке не завжди помічають. Зате в області релаксації хвильових компонент необхідно компенсувати втрату цих степенів вільності за рахунок охолодження хаотичної компоненти газу. Цей ефект помічають завжди.

Рівняння цього теплового балансу для нижніх точок торнадо виглядає так:

$$\alpha_M (3/2)RT_0 + (1 - \alpha_M)(5/2)R \cdot \Delta T = 0, \quad (9)$$

що дає $\Delta T = -T_0(3\alpha_M/5(1 - \alpha_M))$. В (9) всі позначення традиційні, а числові коефіцієнти передбачають цей ефект для двохатомних молекул з повною кількістю степенів вільності 5 (азот). Величина зниження температури для нашого прикладу складатиме $\Delta T = -20$ °С.

Обговорення результатів

Сім див торнадо. Своєрідним підсумком викладенню основного матеріалу запропонованої статті може слугувати перелік фактів, пов'язаних з торнадо, які у вдумливого спостерігача мають пробудити здивування. Здоровою реакцією на здивування є постановка запитання. Якщо на правильно поставлене запитання знаходиться відповідь, то ми на шляху до знання та розуміння. Так зручніше впевнитись у повноті теорії.

1. На початку торнадо фіксують появу структур у вигляді ідеальних кіл.

2. Колові структури завжди зберігають горизонтальне положення.

3. Радіуси колових структур зменшуються при наближенні до землі. І пробігають дискретний ряд значень.

4. Руйнівна здатність зосереджена в стінках торнадо.

5. Стінки торнадо непрозорі.

6. Існує тепловий ефект в околі торнадо.

7. Спостерігаються низькі температури в області стінок торнадо в його нижній частині.

Допоміжна модель. До цієї моделі ми звертаємось виключно з приводу теплових ефектів, які породжує механізм УМХД. У природних умовах не всі вони чітко реєструються або привертають увагу. Власне технічна реалізація у вигляді вихрової труби Ранка – Хілша найкраще ілюструє цю особливість механізму, тому що в ній легко створити умови для їх фіксації.

Оптимальним режимом роботи для такої ілюстрації є поділ вхідного повітряного потоку на два рівнозначних – гарячого та холодного.

Для системи з двоухатомним газом, яким є повітря, умова теплового балансу для холодного потоку буде незначно відрізнятися від (9):

$$\alpha(3/2)RT_0 + \nu(5/2)R \cdot \Delta T = 0, \quad (10)$$

де $\nu = 1/2$ – частина холодного потоку. Тоді зниження температури на холодному отворі порівняно з температурою навколишнього простору $T_0 = 293$ К:

$$\Delta T = -T_0(6\alpha/5). \quad (11)$$

Закономірним є зростання перепадів температур від ступеня анізотропії α . Розрахована нами величина зниження температури для режиму з $\alpha \sim 0,15$ становить $-52,7^\circ\text{C}$. Аналогічно, тільки з протилежним знаком, очікувалась величина підвищення температури на виході гарячого потоку. Порівняння з експериментом ($\Delta T = \pm 49^\circ\text{C}$ [12; 13]) підтверджують наші розрахунки, зроблені на основі УМХД.

Висновки

1. Встановлена висока ефективність УМХД для пояснення розвитку вихрових рухів у необмежених системах. Всі особливості, що характеризують подібні системи, набувають пояснення в рамках УМХД. Зокрема це стосується таких атмосферних явищ, як зародження торнадо.

2. Саме явище торнадо слід розглядати як класичний приклад самозародження в необмежених системах тотожних частинок, як яскраве свідчення хвильових властивостей матерії та наочну демонстрацію високотемпературних квантових явищ.

Список літератури

1. Клапченко В. І., Кузнецова І. О., Краснянський Г. Ю. Фрагментована фізична статистика та процеси самоупорядкування в складних системах. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 53. С. 80 – 90.
2. Клапченко В. І., Кузнецова І. О., Краснянський Г. Ю. Універсальний механізм розвитку процесів самоупорядкування в системах тотожних частинок. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 54. С. 122 – 131.
3. Клапченко В. І., Кузнецова І. О. Квазірелятивізм молекулярних потоків та ентропія упорядкованого хаосу. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2024. № 58. С. 153 – 161.
4. Наливкин Д. В. Урагани, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Ленинград: Наука, 1969. 488 с.
5. Интенсивные атмосферные вихри / под ред. Л. Бенгтссона, Дж. Лайтхилла. Москва: Мир, 1985. 368 с.
6. Хаин А. П. Ураганы – загадки и исследования. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 60 с.
7. Лесняк Е. В. Феномен НЛЮ. Киев: Укрполиграф, 1991. 80 с.
8. Snegirev A. Yu., Mardsen J. A., Fransis J., Makhviladze G. M. Numerical studies experimental observation of whirling flames. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 2005, 57, p. 2523 – 2539.
9. Суслев А. Д., Иванов С. В., Мурашкин А. В., Чижиков Ю. В. Вихревые аппараты. Москва: Машиностроение, 1985. 256 с.
10. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. Самара: Оптима, 1997. 184 с.
11. Гуцол А. Ф. Эффект Ранка. *Успехи физических наук*. Москва, 1997. Т.167, № 6. С. 665 – 687.
12. Ahlborn V. K., Gordon J. M. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle. *Journal of applied physics*, 2000, v. 88, № 6, p. 3645 – 3653.
13. Gao C. Experimental study on the Ranque - Hilsch vortex tube. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. 151 p.
14. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Механика. Москва: Наука, 1989. 576 с.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Москва: Наука, 1964. 568 с.
16. Клапченко В. И. Перколяционный квантовый релятивистский мир. Киев: ВИПОЛ, 1999. 121 с.

Стаття надійшла до редколегії 29.09.2024

Klapchenko Vasily

PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics,

<https://orcid.org/0000-0002-4093-5500>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Kuznetsova Irina

Assistant of the Department of Physics,

<https://orcid.org/0000-0003-1800-1733>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

ALGORITHM FOR THE DEVELOPMENT OF ORDERED VORTEX MOTIONS IN THE ATMOSPHERE

Abstract. This paper is a continuation of the authors' previous papers devoted to the application of the proposed fragmented physical statistics and the universal mechanism of long-range wave action (UMWA) in systems of identical particles. This paper considers scenario No. 2 – conditionally unbounded systems with a mixture of several types of identical particles possessing rotational degrees of freedom of movement. The natural model of such systems is atmospheric vortices (tornadoes). In this work, this model is considered as a basic one. Technical devices that reproduce this scenario are the Ranque-Hilsch vortex tube. It is taken as an auxiliary (or experimental) model. For the basic model, the necessary macroscopic conditions were determined under which the statistical probability of a tornado exceeding 50%. Under these conditions, using the entire arsenal of UMWA, the stages of spontaneous generation and development of a tornado are considered. In particular, the mechanism of self-intensification and self-organization of the circular motion in the area of tornado formation, its shape, the process of the tornado “trunk” falling out, its opacity and the thermal effects accompanying its appearance were clarified. The concepts of wave adhesion and wave condensation are introduced as special semi-quantum phenomena under the conditions of the applicability of classical physics. The corresponding quantitative estimates were made. The validity of quantitative estimates is demonstrated based on the analysis of the results of studies of an auxiliary (experimental) model - the Ranque-Hilsch vortex tube. The main conclusion is drawn: the theoretical basis that fully explains the physical nature of the appearance of a tornado and all its features can be the UMWA.

Keywords: self-ordering algorithm; vortex tube; anisotropy geometry; wave cluster; wave streamer; wave sandwich; corpuscular and wave condensate; wave adhesion; wave quantization; relaxation of wave interaction; tornado

References

1. Klapchenko, V., Kuznetsova, I. & Krasnianskyi, G. (2023). Fragmented physical statistics and self-ordering processes in complex systems. *Management of Development of Complex Systems*, 53, 80–90.
2. Klapchenko, V., Kuznetsova, I. & Krasnianskyi, G. (2023). A universal mechanism for the development of self-ordering processes in systems of identical particles. *Management of Development of Complex Systems*, 54, 122–131.
3. Klapchenko, V. & Kuznetsova, I. (2024). Quasirelativism of molecular flows and entropy of ordered chaos. *Management of Development of Complex Systems*, 58, 153–161.
4. Nalivkin, D. V. (1969). *Hurricanes, storms and tornadoes*. Geographical features and geological activity.
5. Bengtsson, Ed. L. & Lighthill, J. (1985). Intense atmospheric vortices
6. Khain, A. P. (1987). *Hurricanes – mysteries and research*. Gidrometeoizdat.
7. Lesnyak, E. V. (1991). *The UFO phenomenon*. Ukrpoligraf.
8. Snegirev, A. Yu., Marsden, J. A., Fransis, J. & Makhviladze, G. M. (2005). Numerical studies experimental observation of whirling flames. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 57, 2523–2539.
9. Suslov, A. D., Ivanov, S. V., Murashkin, A. V. & Chizhikov, Yu.V. (1985). *Vortex devices*. Mechanical Engineering.
10. Merkulov, A. P. (1997). *Vortex effect and its application in technology*. Optima.
11. Gutsol, A.F. (1997). Ranque effect. *Advances in physical sciences*, 167(6), 665–687.
12. Ahlborn, B. K. & Gordon, J. M. (2000). The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle. *Journal of applied physics*, 88(6), 3645–3653.
13. Gao, C. (2005). *Experimental study on the Ranque - Hilsch vortex tube*. Eindhoven. Technische Universiteit Eindhoven.
14. Sivukhin, D. V. (1989). *General course of physics*. Mechanics.
15. Landau, L. D. & Lifshits, E. M. (1964). *Statistical Physics*. Nauka.
16. Klapchenko, V. I. (1999). *Percolation quantum relativistic world*. VIPOL.

Посилання на публікацію

- APA Klapchenko, V. & Kuznetsova, I. (2024). Algorithm for the development of ordered vortex motions in the atmosphere. *Management of Development of Complex Systems*, 60, 230–238, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.230-238.
- ДСТУ Клапченко В. І., Кузнецова І. О. Алгоритм розвитку упорядкованих вихрових рухів в атмосфері. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2024. № 60. С. 230 – 238, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.230-238.