

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.С.Опанасюк, Р.Ю.Лопаткін

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
НА ТЕМУ “СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ” З
КУРСУ «ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА»
ЧАСТИНА 3 "МАКРОСВІТ"
*для студентів усіх спеціальностей денної та заочної форм
навчання*

СУМИ ВИД-ВО СУМ ДУ 2004

АНОТАЦІЯ

Остаточним завданням викладання курсу “Загальної фізики” у вищій школі є формування у студентів наукових уявлень про навколишній Всесвіт, вищою формою узагальнення та систематизації яких є картина світа. Даний факт констатується у навчальній програмі курсу фізики, останнім питанням якої є тема “Сучасна фізична картина світу”. Разом з тим завдяки науковій революції уявлення про будову навколишнього світу і місце людини у ньому змінюються дуже швидко. Це приводить до того, що новітні досягнення фізики, як правило, не встигають вноситися до навчальних посібників та підручників. Розроблений конспект лекцій частково вирішує цю проблему, оскільки базується на найбільш сучасному матеріалі, який є у науковій літературі. У третій частині конспекту лекцій розглядаються сучасні фізичні уявлення про будову та закони макросвіту. Автори зробили спробу викласти складні наукові теорії, не виходячи за межі курсу фізики вищої школи.

Конспект лекцій призначений для студентів і викладачів, які виявляють інтерес до новітніх досягнень фізики. Він може бути також використаний при викладанні курсів “Концепції сучасного природознавства” та “Методика викладання фізики”.

Не то, что мните вы, природа:
Не слепок, не бездумный лик -
В ней есть душа, в ней есть
свобода,
В ней есть любовь, в ней есть
язык.

Ф. Тютчев

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВВЕДЕННЯ

Звичайно, передній фронт фундаментальних досліджень у фізиці пов'язують з гігантськими астрофізичними масштабами або мікроструктурою матерії. Разом з тим протягом останніх двох-трьох десятиліть фактично відбулася революція у області дослідження явищ, які чудово описуються класичною механікою і належать до макросвіту. Якщо розвиток науки ХХ століття проходив під знаком відкриття фундаментальної ролі законів симетрії у світобудові, починаючи з мікросвіту і закінчуючи мегасвітом, то кінець цього століття був позначений усвідомленням видатної ролі у процесах, що відбуваються у природі, явищ динамічного хаосу, самоупорядкування та саморозвитку у відкритих системах. Незважаючи на те, що ці відкриття визначають сучасну картину світу, вони залишаються мало відомими для студентів і майже не освітлені у навчальній літературі. Саме тому вони розглянуті у даному конспекті лекцій.

1 СИМЕТРІЯ І АНТИСИМЕТРІЯ У ПРИРОДІ

Сучасна фізика вважає, що в пізнанні навколишнього світу є три ступені знання: *рівень явищ або подій, законів природи і нарешті, принципів симетрії*. Підіймаючись цими сходами вдається все глибше і глибше пізнавати природу, краще її розуміти. Найбільш елементарним є рівень явищ. До нього належить все, що відбувається у світі: рух тіл, зіткнення частинок, поглинання і випромінювання світла і багато інших явищ. З першого погляду здається, що між ними немає нічого спільного. Проте при більш уважному розгляді можна встановити, що між явищами є певні стійкі взаємозв'язки, що повторюються – об'єктивні закономірності. Людство ж познає закони – відображення цих об'єктивних закономірностей у нашій свідомості. Закони завжди теж носять об'єктивний характер і виражають реальні процеси, що зв'язують явища навколишнього світу.

В принципі, якби фізики мали у своєму розпорядженні повну інформацію про всі явища і події у світі, то знання законів не було б потрібно. З іншої боку, якби були відомі всі закони або один загальний закон природи, до чого весь час прагнуть фізики, то властивості інваріантності цих законів не давали б ніякої нової

інформації. Але, на жаль, навіть більшість законів природи фізикам не відома, тому вони шукають закономірності (симетрію) у самих законах природи. Пізнання властивостей симетрії, як писав Е. Вігнер, “полягає в наділюванні структурою законів природи або встановленні між ними внутрішніх зв'язків, так само, як закони встановлюють структуру або взаємозв'язок у світі явищ”. Таким чином, якщо *закони керують явищами*, то *принципи симетрії – це закони фізичних законів*.

Виявлення різних симетрій у природі, а іноді і постулювання їх, стало одним із методів теоретичного дослідження мікро-, макро- і мегасвітів. *Закони природи дозволяють передбачати явища, а принципи симетрії – відкривати закони природи*. Наприклад, рівняння Максвелла в електродинаміці отримані на ґрунті симетрії між електричними і магнітними явищами. Максвел виходив з переконання, що взаємодії електричного і магнітного полів повинні бути симетричними, і тому ввів у свої рівняння додатковий доданок (що описує струм зміщення), який цю обставину враховує. В результаті впевненість у симетрії законів природи привела його до висновку про існування електромагнітних хвиль. Можна сказати, що й ідеї А. Ейнштейна, які привели його до створення теорії відносності, спиралися на упевненість у глибокій симетрії природи, яка повинна одночасно охоплювати механічні, електромагнітні та всі інші явища. Принципи симетрії зіграли також вирішальну роль при побудові теорій суб'ядерних частинок, що дозволили створити їх сучасну класифікацію. Встановлення прихованих симетрій у природі дозволяє об'єднати розрізнені знання у єдину теорію та побудувати цілісну картину світу. Математичним апаратом який дозволяє це зробити є теорія груп (симетрії).

Таким чином, *усі фізичні закони і явища природи підпорядковуються певним законам симетрії*. Сьогодні відомо декілька симетрій фізичних законів:

1 Фізичні закони незмінні, інакше говорячи, *інваріантні* відносно до перенесення у просторі, що обумовлене однорідністю останнього.

2 Фізичні закони інваріантні у відношенні до поворотів у просторі. Цю властивість називають *ізотропією простору*.

3 Симетрія фізичних законів визначається і однорідністю

часу, тобто вони інваріантні у відношенні до перенесень у часі.

4 Принцип відносності законів природи – це теж симетрія у відношенні до переходу з однієї інерціальної системи відліку в іншу. Ця симетрія встановлює *рівнозначність усіх інерціальних систем відліку*.

5 Протікання фізичних явищ не змінюється при перестановці двох ідеально однакових частинок (наприклад, електронів або протонів) – це так звана *перестановочна симетрія*.

6 Ще один вид симетрії фізичних законів – інваріантність у відношенні до віддзеркалення. Це означає, що дві фізичні установки, одна з яких побудована як дзеркальне відображення іншої, функціонуватимуть однаково.

Існує глибокий зв'язок між симетрією і законами збереження у природі. На початку ХХ ст. Е. Нетер сформулювала теорему, згідно з якою якщо властивості системи не змінюються від якогось її перетворення, то цьому відповідає деякий закон збереження (теорема Нетер). Оскільки незалежність властивостей від перетворення означає наявність в системі симетрії відносно даного перетворення, теорема Нетер може бути сформульована іншим чином. *Наявність в системі симетрії обумовлює існування для неї фізичної величини, що зберігається*. Наприклад, *закон збереження імпульсу є наслідком однорідності простору, а закон збереження енергії – наслідком однорідності часу*.

Таким чином, *симетрія завжди пов'язана із збереженням* і виділяє в навколишньому світі різні інваріанти – якісь своєрідні “опорні точки” Всесвіту. Можна сказати, що симетрія створює порядок у нашому світі. В оточуючому нас Всесвіті “все тече, все змінюється,” він наповнений взаємодіями і перетвореннями, всюди присутня випадковість і невизначеність. Але при цьому закони світу мають симетрію: енергія та імпульс зберігаються, за літом йде осінь, а потім зима та ін. Симетрія виділяє загальне як в об'єктах, так і в явищах, підкреслюючи, що, не дивлячись на те, що світ різноманітний, у той самий час він і єдиний, оскільки в різноманітних явищах природи присутні елементи спільності.

Добре відомо, що закони класичної фізики перестають працювати у мікросвіті, замість них використовуються закони квантової механіки. Те саме відбувається при збільшенні швидкості руху системи та наближенні її до швидкості світла, тут

працює релятивістська теорія. Все це вже прояв асиметрії законів природи.

Симетрія і асиметрія – дві полярні протилежності об'єктивного світу. На різних рівнях розвитку матерії присутні то симетрія – відносний порядок, то асиметрія – тенденції порушення спокою, початок руху, розвитку. Асиметрія присутня вже на рівні елементарних частинок і виявляється в абсолютному переважанні в нашому Всесвіті частинок над античастинками. Розвиток Всесвіту з моменту його зародження теж виглядає як безперервна послідовність *порушення симетрії*. У момент свого виникнення в результаті Великого Вибуху Всесвіт був симетричний і однорідний. У міру охолодження в ньому порушувалися одна симетрія за іншою, що створило можливості для виникнення і існування все більшої і більшої різноманітності структур. Феномен життя теж природно вписується у цю картину. Життя – це ще один різновид порушення симетрії.

Симетрія і асиметрія складають єдність, вони взаємозв'язані одна з одною, як два боки однієї медалі. Неможна уявити повністю симетричний світ, так само, як і неможливо помислити про світ, взагалі позбавлений симетрії. Симетрія є основою речей і явищ, виражаючи щось загальне, властиве різним об'єктам, тоді як асиметрія пов'язана з індивідуальним втіленням цього загального у конкретному об'єкті.

Принципи симетрії лежать в основі теорії відносності, квантової механіки, фізики твердого тіла, атомної і ядерної фізики, фізики елементарних частинок. Розроблений також метод розв'язку задач з міркувань симетрії.

Принципи симетрії виражають найбільш загальні властивості природи, вони мають більш фундаментальний характер, ніж закони руху. Тому перевірка принципів симетрії завжди цікавила фізиків, а *пошук нових симетрій складає одну з найбільш важливих задач фізики взагалі*. Пошук нових властивостей симетрії – це разом з тим пошук нових законів збереження у природі.

Однією з чудових симетрій природи є її самоподібність або так звана *масштабна інваріантність (скейлінг)*. Цю незвичайну симетрію розглянемо у наступному розділі.

2 ФРАКТАЛИ

При побудові моделей, що описують навколишній світ, люди звикли використовувати такі відомі геометричні поняття, як лінія, круг, сфера, квадрат, куб та ін. Однак виявилось, що ці прості образи не завжди адекватно описують природні об'єкти. Геометрія Евкліда не здатна описати форму хмар, гір, дерев, берега моря та ін. Справа в тому, що хмари – це не зовсім сфери, гори – не зовсім конуси та ін. Світ влаштований за дещо іншими законами, в природних структурах, як правило, кількість різних масштабів нескінченна. Між тим зовсім недавно математики розробили математичні поняття, які дозволяють описати навіть такі складні природні об'єкти. Це дозволяє зробити так звану *фрактальну геометрію*, центральним поняттям якої є поняття "*фрактал*".

Термін фрактал ("*frangere*" - ламаний об'єкт з дробовою розмірністю) був запропонований Бенуа Мандельбротом в 1975 році для позначення нерегулярних, але самоподібних структур, якими він займався. Народження фрактальної геометрії прийнято пов'язувати з виходом у 1977 році книги Мандельброта «Fractal Geometry Nature» - «Фрактальна геометрія природи». В його роботах використані наукові результати інших учених, що працювали у період 1875-1925 років в тій самій області (Пуанкаре, Фату, Жюліа, Кантор, Хаусдорф).

Існує безліч різних визначень фрактала. Перш за все, *математичне поняття фрактала виділяє об'єкти, що мають структури різних масштабів, які відображають ієрархічний принцип їх організації*. Фрактали мають властивість *самоподібності*: їх вигляд істотно не змінюється при розгляді з різним збільшенням, тобто фрактал виглядає практично однаково, в якому б масштабі його не спостерігали. Іншими словами, *фрактал складається з однотипних елементів різних масштабів і, по суті, є узором, що повторюється при зміні масштабів*. Малий фрагмент такого об'єкта подібний до іншого, більш великого фрагмента, або навіть до структури у цілому. Тому говорять, що фрактал є структурою, що складається з частин, які подібні до цілого.

Типовим прикладом геометричного фрактала є так звана *крива Коха* (рис. 1). Вона будується таким чином. Початковий

відрізок одиничної довжини (*генератор*) ділиться на три однакові частини. Потім виконуються побудови, зображені на рис. 1.

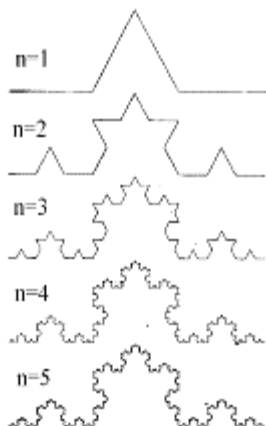


Рисунок 1 – Побудова тріадної кривої Коха (розглянуті перші п'ять поколінь). Ця крива може бути використана для моделювання берегової лінії

У результаті в першому поколінні ($n = 1$) одержуємо ламану криву, що складається з чотирьох ланок завдовжки $1/3$ початкової. Довжина всієї кривої в цьому поколінні складає $L(1/3) = 4/3$. Наступне покоління ($n = 2$) одержуємо шляхом тієї самої операції над кожною прямолінійною ланкою першого покоління. Тоді одержуємо криву, що складається з $N = 4^2 = 16$ ланок, завдовжки $\delta = 3^{-2} = 1/9$ кожна. Вся довжина відрізка дорівнює $L(1/9) = (4/3)^2 = 16/9$. Продовжуючи цю процедуру далі, одержимо, що на n -му кроці довжина прямолінійної ланки складає $\delta = 3^{-n}$. Крива n -го покоління при будь-якому скінченному n називається *передфракталом*. Якщо n спрямувати до нескінченності, крива Коха стає фрактальним об'єктом [3].

Для одержання іншого фрактального об'єкта потрібно змінити правила побудови. Нехай утворюючим елементом будуть два однакових відрізки, з'єднаних під прямим кутом. У нульовому поколінні замінимо одиничний відрізок на цей утворюючий елемент так, щоб кут був зверху. Можна сказати, що при такій заміні відбувається зсув середини ланки. При побудові наступних

поколінь виконується правило: найперша ліворуч ланка замінюється на утворюючий елемент так, щоб середина ланки зміщувалася вліво від напрямку руху, а при заміні наступних ланок, напрямки зсуву середин відрізків повинні чергуватися. На рис.2 зображені декілька перших поколінь і 11-те покоління кривої, побудованої за вищеописаним принципом. Відповідна гранична фрактальна крива, (при $n \rightarrow \infty$) називається "драконом" Хартера-Хейтуея.

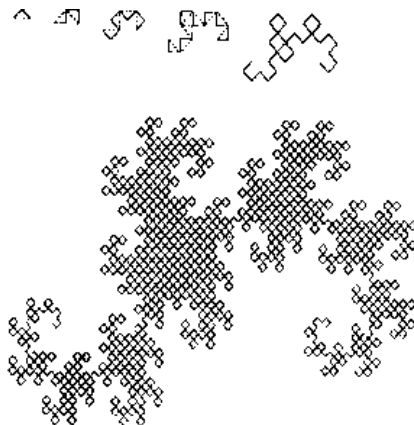


Рисунок 2 – Побудова "дракона" Хартера-Хейтуея

Головна особливість фракталів полягає у тому, що вони мають дробову розмірність. Це є наслідком масштабної інваріантності. З математичної точки зору геометричні об'єкти, у тому числі і фрактали, можна розглядати як множину точок, вкладених у простір. Наприклад, множина точок, що створюють лінію у евклідовому просторі, має розмірність $D = 1$, а безліч точок, що створюють поверхню у тривимірному просторі, має розмірність $D = 2$. Відповідно об'ємне тіло має розмірність $D = 3$. Характерна особливість цих геометричних об'єктів полягає у тому, що довжина лінії, площа поверхні або об'єм тіла пропорційні відповідно лінійному масштабу у першому, у другому або третьому ступені, тобто їх розмірність дорівнює розмірності простору, в який вони вкладені. Проте для фракталів це не так, їх розмірність може

виражатися дробовим числом $1 < D_f < 3$, де D_f – фрактальна розмірність.

Для прикладу визначимо фрактальну розмірність кривої Коха. Кількість поколінь цієї кривої можна подати у вигляді $n = \ln(\delta) / \ln(3)$, а довжину всієї ламаної – як $L(\delta) = (4/3)^n = \exp(\ln \delta (\ln 4 - \ln 3)) = \delta^{1-D_f}$. Тоді кількість сегментів – $N(\delta) = 4^n = 4^{-\ln \delta / \ln 3}$ і може бути записана таким чином: $N(\delta) = \delta^{-D_f}$. Виявляється, що крива Коха є фракталом з фрактальною розмірністю $D_f = \ln 4 / \ln 3 = 1,2628$.

Можна побудувати і такі об'єкти, для яких необхідно вводити не одну, а декілька розмірностей. Іноді такі об'єкти називають математичними фракталами, вони на відміну від природних або фізичних фракталів мають ідеальну самоподібність. Для фізичних фракталів (реально існуючі об'єкти) самоподібність або масштабна інваріантність виконується приблизно (або як кажуть, у середньому). Прикладом фрактального об'єкта, що часто спостерігається в природі, є берегова лінія. На рис.3 показана південна частина побережжя Норвегії, яке має вигляд дуже порізаної лінії.



Рисунок 3 – Узбережжя південної частини Норвегії

Можна показати, що виміряти довжину такої лінії, використовуючи звичайні способи евклідової геометрії, неможливо. Але для цього добре підходить фрактальна геометрія. Виявилось, що довжина берегової лінії добре описується

формулою $L(\delta) = a\delta^{1-D_f}$, де δ – масштаб, що використовується для вимірювання (наприклад, деякий розхил циркуля), a – кількість одиниць масштабу. Для бережжя Норвегії $D_f \sim 1,52$, для берегової лінії Великобританії – $D_f = 1,3$ і т. ін.

Виявилось, що в природі фрактальні структури спостерігаються дуже часто: контури хмар, блискавка, дим, дерева, берегова лінія і русла річок, тріщини в матеріалах, бронхи легенів, пористі губки, поверхні порошоків, артерії і багато інших структур, які не мають, на перший погляд закономірностей в своїй будові. Але відсутність порядку в них – це ілюзія, яка виникає при першому ознайомленні. Введення понять фрактала і фрактальної геометрії дозволяє виділити раніше приховані закономірності в будові і властивостях природних об'єктів, класифікувати їх та досліджувати особливості.

Зараз вважається, що фрактальний світ добре відображає реальний, оскільки властивості фракталів демонструють багато природних об'єктів. Тому часто говорять, що книга природи написана мовою фракталів. Така дивна схожість реального і фрактального світів обумовлена, перш за все, тим, що властивості фізичного світу змінюються повільно із зміною масштабів. У піску на березі багато властивостей, загальних із властивостями гальки, гори мають багато спільного з каменями, що їх складають, маленький струмочок багато в чому схожий на велику річку. Саме така незмінність відносно масштабу – характерна риса фракталів.

Різні фрактальні множини можна одержувати і за допомогою простих (елементарних) перетворень, наприклад, типу $x_{n+1} = x_n^2 + c$, де x – комплексна змінна, c – деяке комплексне число, $n = 1; 2; 3...$ Коли подібний розрахунок виконується з різними початковими значеннями x , в деяких випадках результат у ході ітераційного процесу буде збільшуватися до нескінченності, у той час як у інших буде залишатися кінцевим. Відповідно, набір усіх значень x , або точок на комплексній площині, які при ітерації обмежені деякою границею, тобто є кінцевими, одержав назву *множини Жуліа*. Для того щоб визначити тип множини Жуліа для деякої константи c ітерацію необхідно кожний раз виконувати для декількох тисяч точок, поки не з'ясується, продовжують значення результату збільшуватися чи залишаються кінцевими. Якщо точки

комплексної площини при яких одержуємо кінцевий результат помічати чорним кольором, а ті при яких він необмежено збільшується білим, виникне складна чорна фігура на білому фоні.

Для кожної константи c можна отримати різні множини Жулі, тому число цих множин необмежене. Відображаючи їх на площині або в тривимірному просторі, одержують дивно красиві зображення, що нагадують реальні природні структури (рис.4).

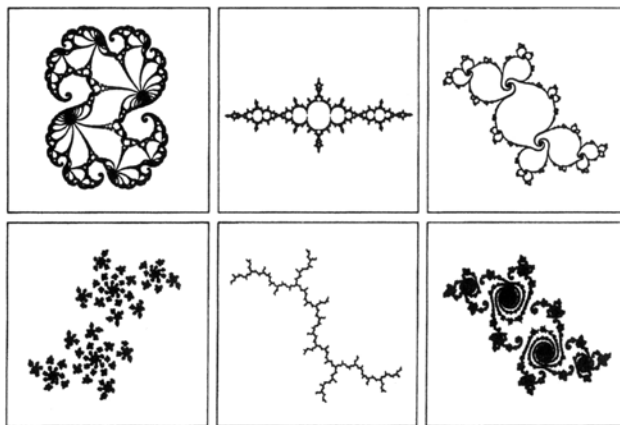


Рисунок 4 – Різноманіття фрактальних множин Жуліа

При класифікації фракталів прийнято поділяти їх на *детерміновані* (алгебраїчні і геометричні) і *недетерміновані* (стохастичні). Алгебраїчні фрактали є найбільш великою групою фракталів. Одержують їх за допомогою нелінійних процесів у n -вимірних просторах. Найбільш вивчені двовірні процеси.

Стохастичні фрактали одержують у тому випадку, якщо в ітераційному процесі випадковим чином змінювати які-небудь його параметри. При цьому виходять об'єкти дуже схожі на реальні: несиметричні дерева, порізані берегові лінії і т.ін. В зв'язку з цим двовимірні стохастичні фрактали дуже часто використовуються при моделюванні різних природних об'єктів: рельєфу місцевості, поверхні моря і таке інше (див. рис. 5).

Цікаво відзначити, що фрактальна математика сьогодні дуже широко застосовується, вона може бути використана для аналізу змін цін і заробітної платні, статистики помилок на телефонних станціях і навіть опису Всесвіту у цілому.

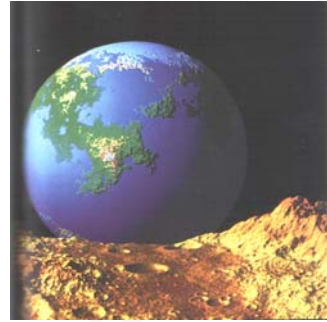
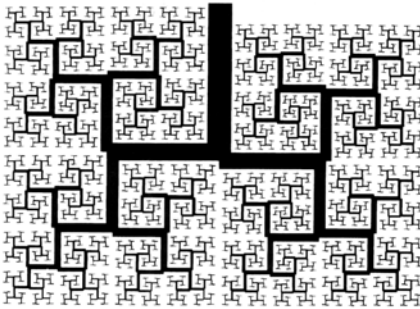


Рисунок 5 – Використання стохастичних фракталів для моделювання природних об'єктів

3 НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА

3.1 Динамічні і статистичні теорії

Усі існуючі сьогодні фундаментальні фізичні теорії можна розділити на дві групи – *динамічні* і *статистичні*. В динамічних теоріях величини підпорядковуються однозначним закономірностям; статистичні теорії ґрунтуються на законах вірогідності. До динамічних теорій належать: класична механіка, механіка суцільних середовищ, феноменологічна термодинаміка, класична електродинаміка, спеціальна і загальна теорії відносності. Прикладами статистичних теорій є статистична механіка, мікроскопічна електродинаміка, всі квантові теорії.

Основу будь-якої фізичної теорії складають три елементи: *сукупність фізичних величин*, за допомогою яких описуються об'єкти або явища даної теорії (наприклад, в механіці Ньютона – це координати, імпульс, енергія, сила); поняття *стану і рівняння руху*, які описують еволюцію стану даної системи. *Динамічні системи є детерміністичними*. Принцип детермінізму особливо просто виглядає в класичній механіці, яка вчить, що за початковими даними можна повністю описати рух (поведінку або, як говорять фізики, стан) механічної системи в будь-який момент часу. Такий механічний детермінізм називають *лапласівським* (за ім'ям фізика та математика П.С.Лапласа, який сформулював ці ідеї).

Поняття про статистичні закономірності вперше було введено у фізику в 1859 р. Максвеллом (на рис. 6 наведена функція

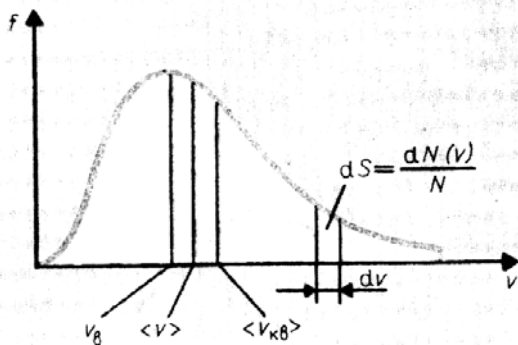


Рисунок 6 – Функція Максвелла f , що характеризує розподіл молекул ідеального газу за швидкостями v

Максвелла). Для опису систем, що складаються з великої кількості частинок (газу), він ввів у фізику поняття вірогідності, яке використовується в математиці для аналізу випадкових процесів.

Численні досліди показали, що у принципі неможливо не тільки простежити за зміною імпульсу або положенням однієї молекули газу протягом достатньо великого інтервалу часу, але й точно визначити імпульси і координати всіх його молекул в даний момент, оскільки їх кількість дуже велика. Тому ці величини слід розглядати як випадкові, що в даних макроскопічних умовах набувають різних значень, і описувати за допомогою поняття вірогідності. Використання вірогідності у цьому випадку обумовлено незнанням нами деталей протікання процесу.

Статистичні теорії відрізняються від динамічних, перш за все, поняттям стану системи. На відміну від динамічних в статичних теоріях поведінка системи описується не значеннями фізичних величин, а законами їх розподілу (статистичним розподілом ймовірності). Цей розподіл визначає вірогідність того, що дані величини набувають тих або інших значень у визначеному інтервалі. Самі ж величини є випадковими, тобто не мають певних значень у заданих умовах. Статистичний розподіл підпорядковується певним рівнянням руху, які описують його

еволюцію і дозволяють однозначно визначити середні значення відповідних фізичних величин у будь-який момент часу. Знаходження середніх значень фізичних величин – це основна задача всіх статистичних теорій.

Хоча описані вище два підходи до опису явищ природи є зовсім різними, у них існує спільна риса: в якості математичного апарата вони використовують лінійні рівняння.

3.2 Динамічний хаос

Довгий час вважалося, що прості системи, які описуються динамічними теоріями, повинні поводитися однозначно і детерміновано, тобто повністю передбачено. В результаті при розгляді таких систем немає необхідності звертатися до поняття вірогідності. Проте виявилось, що так буває не завжди. Вже відзначалося, що в класичній механіці можливо однозначне визначення майбутнього стану системи за її початковими даними: положенням у просторі та швидкістю. Строго кажучи, це є всього лише абстракцією, ідеалізацією, *реально здійснення ідеального класичного детермінізму практично неможливе*. Дійсно, по-перше, *початкові дані не можуть бути визначені нескінченно точно*, по-друге, *в процесі руху на систему діють випадкові сили*, які, як правило, не враховуються (або про них нічого не відомо). Навіть якщо ці сили малі, то їх ефект може виявитися значним після закінчення достатньо великого проміжку часу дії. По-третє, *неможливо гарантувати, що в процесі руху система залишатиметься ізольованою*. Тому для опису системи необхідно задавати умови на межі тієї області, усередині якої вона рухається.

Перелічені обставини, звичайно, *ігноруються* (або замовчуються) при викладі класичної механіки у курсі загальної фізики. Проте, як показує аналіз, вони істотно впливають на прогнози, що витікають із законів класичної механіки. Вплив випадковостей у загальному вигляді не може бути ігноровано, оскільки з часом невизначеність у початкових даних нагромаджується. В результаті *прогноз поведінки систем після деякого кінцевого часу стає абсолютно беззмістовним*.

Вперше до цього висновку дійшов А. Пуанкаре на початку ХХ ст., коли показав, що в певних механічних системах, еволюція яких у часі описується відомими рівняннями, може з'являтися

хаотичний рух. Висновки були такими не звичними, що науковий світ спочатку ці ідеї не сприйняв, вважаючи їх курйозом.

У 1963 р. метеоролог Е. Лоренц (*"Journal Atmospheric Sciences"*) показав, що навіть розв'язок достатньо простої системи, яка складається з трьох нелінійних рівнянь першого порядку, взагалі кажучи, виявляється випадковим. Це означає, що *рух, який передбачається класичною механікою, врешті реалізується нестійким відносно малих випадкових відхилень початкових даних або в результаті дії випадкових сил*. Які б малі не були ці дії, завжди можна знайти такий час, при якому їх ефект виявляється превалюючим. У результаті для кожної механічної системи існує деякий критичний час, починаючи з якого неможливо точно передбачити її поведінку. Ця нестабільність руху відносно малих випадковостей повністю руйнує ілюзію про можливість однозначного прогнозу майбутнього системи за її початковими даними без того, щоб надалі не вносити корективи в опис системи. Таким чином, з'ясувалося, що вірогідність виявляє себе навіть там, де безсумнівно вважалося, що царюють однозначні причинно-наслідкові зв'язки. Випадковості виявляються, наприклад, у поведінці дуже простих динамічних систем, що описуються в рамках класичної механіки і гідродинаміки. Отже, *хаотична, випадкова поведінка можлива навіть в дуже простих динамічних системах*. Дане явище отримало назву *динамічного або детермінованого хаосу*. Його відносять до рангу найвидатніших відкриттів сучасної науки.

Під динамічним хаосом розуміють нерегулярну або хаотичну поведінку простої системи, що підпорядковується регулярним, невинуватим динамічним законам. Або коротко – це народження випадкового з невинуватим. Для спостереження даного явища система обов'язково повинна бути нелінійною, тобто описуватися нелінійними рівняннями. Це призводить до того, що стає неможливим передбачити поведінку таких систем на великих проміжках часу. Свого часу це викликало потрясіння серед фізиків, схоже з тим, що відбулося після відкриття квантової механіки. Вивчає такі процеси наука, яка одержала назву *нелінійної динаміки*.

Сьогодні відомо, що більшість рівнянь класичної механіки призводить до хаосу, або, як кажуть, *ці рівняння не інтегруються*. Тому єдиний метод їх розв'язку - числові методи. Навіть у відомій

задачі трьох тіл, як вже відмічалось, можуть виникати хаотичні рухи. Звідси виникає питання і про стійкість, наприклад Сонячної системи і будь-якої планетної системи взагалі

До сьогодні відкрито декілька шляхів переходу до хаосу. Зокрема виникнення динамічного хаосу пов'язують із нестійкістю руху системи у відношенні до початкових умов. Таку чутливість до початкових умов іноді називають ефектом "метелика". Саме така нестійкість детерміністичну динаміку перетворює у випадкову. *Нестійка динамічна система виявляється, по суті справи, системою статистичною.*

Сьогодні відома достатньо велика кількість систем, в яких має місце такий ефект: саме так поводить ся рідина поблизу порогу виникнення турбулентності; він виникає в лазерах і нелінійній оптиці, хімічних реакціях і біологічних моделях популяцій та ін. Усі ці системи виявляються нестійкими і тому статистичними, не дивлячись на те, що їх поведінка в часі детермінована, тобто описується відомими диференціальними рівняннями, які визначають їх майбутнє, виходячи з початкових умов. Саме тому, наприклад, при виведенні космічних апаратів на орбіту доводиться регулярно здійснювати корекцію їх руху, щоб запобігти випадковим відхиленням від розрахункової траєкторії. З цим же пов'язана неможливість довгострокового прогнозу погоди (правда, тут все значно складніше). Зараз встановлено, що явища які описуються нелінійними рівняннями в природі відбуваються дуже часто. За висловом британського математика Я. Стюарта природа виявилася "безжалісно нелінійною". При цьому хаотична поведінка системи виникає не завдяки зовнішнім джерелам шуму, не через нескінченну кількість степенів вільності або невизначеність, пов'язану з квантовою механікою, а через внутрішні властивості самої системи.

Фізики довго вважали, що через майже однакові причини можуть бути майже однакові наслідки, причому як в природі, так і в добре спланованому експерименті. Як правило, так і відбувається насправді, особливо на коротких часових інтервалах. Але це виявляється не завжди правильним для великих проміжків часу навіть у разі типового перебігу природних процесів – одна і та сама причина може приводити до абсолютно різних наслідків. Іншими словами, навіть найменші відхилення на початку руху

можуть привести через певний час до гігантських відмінностей у його кінці, тобто через надзвичайно малі причини викликають через деякий час величезні наслідки. Для природних процесів це типове явище.

3.3 Основні поняття нелінійної динаміки

Для пояснення основних ідей та понять, що використовуються нелінійною динамікою, розглянемо ряд простих моделей добре відомих з курсу загальної фізики.

За одну з таких моделей виберемо математичний маятник без тертя. Добре відомо, що *математичним маятником* називається точкова маса m , що підвішена до жорсткого невагомому стрижня, довжиною l (рис. 7). Така система у полі тяжіння з прискоренням g може здійснювати *вільні коливання* навколо точок R або R' . Одна з цих точок відповідає стану стійкої рівноваги маятника, інша – нестійкої.

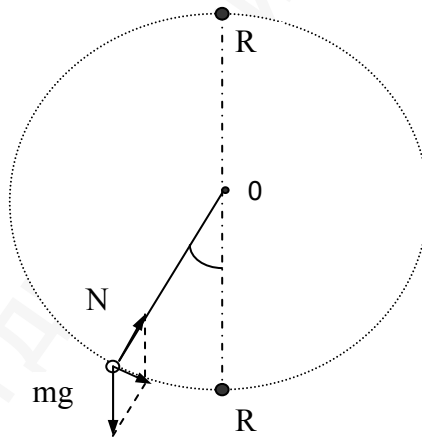


Рисунок 7 – Математичний маятник

При відхиленні маятника від положення рівноваги виникає обертальний момент $M = mgl \sin \theta$, який намагається повернути його у вихідний стан. Записавши основне рівняння динаміки обертального руху для маятника і врахувавши, що його момент інерції дорівнює $I = ml^2$, легко одержуємо таке співвідношення:

$$ml^2 \theta'' = -mgl \sin \theta.$$

Останнє рівняння можна звести до вигляду, добре відомого з загального курсу фізики.

Звичайно стан маятника описують за допомогою таких змінних, як кут θ та миттєве значення його похідної $\theta' = \frac{d\theta}{dt}$,

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0. \quad (1)$$

Це рівняння є нелінійним, але при малих кутах θ , коли $\sin \theta \approx \theta$, воно стає лінійним і легко піддається інтегруванню. В результаті цього одержимо рівняння звичайних гармонічних коливань

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ – кутова частота; φ – початкова фаза.

Це рівняння дозволяє знайти положення, швидкість та прискорення маятника у будь-який момент часу.

Можливий і інший опис руху маятника. Для повного опису його миттєвого стану необхідно і достатньо знання усього двох величин: кута $\theta(t)$ і швидкості $d\theta/dt = \theta'$ (або імпульсу). Отже, замість інтегрування рівняння (1) можна просто подати розв'язок у прямокутній системі координат (θ, θ') . У ідеальному випадку, що розглядається нами, розв'язком є замкнута крива, що описує орбіту маятника на площині. На практиці такого роду уявлення відіграють істотну роль у всіх дослідженнях динаміки систем через таку просту причину: *таке уявлення є альтернативою у тих випадках, коли аналітичне інтегрування диференціальних рівнянь виявляється неможливим.*

Будь-яку систему, що рухається у тривимірному просторі, можна описати за допомогою шести чисел, які відповідають координатам тіла та проєкціям його швидкостей (імпульсів) на осі

координат. Як правило, використовують так звані узагальнені координати (q_i) та імпульси (p_i). Тоді для опису динаміки системи можна ввести багатовимірний (фазовий) простір, у якому осями координат є координати і проєкції швидкостей (імпульсів) тіла на осі координат. Точку, що описує стан системи у цьому просторі в даний момент часу, називають *M-точкою*, а криву у фазовому просторі, що описує еволюцію системи з часом, – фазовою траєкторією. Сукупність фазових траєкторій, яка виникає при зміні початкових умов, називається фазовим портретом системи. Іншим важливим поняттям, що характеризує систему, є кількість ступенів її вільності, добре відоме читачу із загального курсу фізики.

Нагадаємо, що N тіл, здатних вільно рухатися по трьом просторовим напрямкам, мають $3N$ ступенів вільності. У прикладі осцилятора, що розглядається нами, початкове положення і швидкість – це дві величини, які можуть бути задані довільно, тому можна говорити, що маятник – це система з двома ступенями вільності, відповідно його фазовий простір є двовимірним. Це правило може бути застосовано для будь-яких систем.

3.4 Опис руху у фазовому просторі

Застосуємо наведені вище визначення і поняття до дослідження нелінійного рівняння (1). В кожній точці на фазовій площині (θ, θ') це рівняння визначає орієнтацію дотичної до траєкторії. Фазову траєкторію маятника легко побудувати якісно шляхом простих міркувань. У точках найбільшого відхилення від стану рівноваги кут θ набуває максимального значення, в той час як швидкість маятника θ' дорівнює нулю. Це дає дві точки на горизонтальній осі. У стані рівноваги кут відхилення дорівнює нулю, а швидкість маятника максимальна, одержуємо ще дві точки на вертикальній осі. Легко показати, що інші точки лежать на еліпсі, який шляхом зміни масштабу можна перетворити у коло.

У розглянутому нами прикладі важливе спрощення при побудові фазової траєкторії виникає у зв'язку з тим, що величина $E(\theta, \theta')$, яка визначається співвідношенням

$$E(\theta, \theta') = \frac{1}{2}\theta'^2 + \frac{g}{l}(1 - \cos \theta), \quad (3)$$

є інтегралом руху, тобто не змінюється під час руху. Дійсно

$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta \right) \equiv 0. \quad (4)$$

Легко простежити, що з точністю до множника розмірності ml ця величина є енергією маятника. Отже, *фазові траєкторії, що задовольняють рівняння (1), є кривими постійної енергії або контурами енергії E на фазовій площині (рис. 8). Оскільки енергія E – періодична функція кута θ (з періодом 2π), траєкторії достатньо побудувати в області $\theta \in [-\pi, +\pi]$, $\theta' \in [-\infty, +\infty]$.*

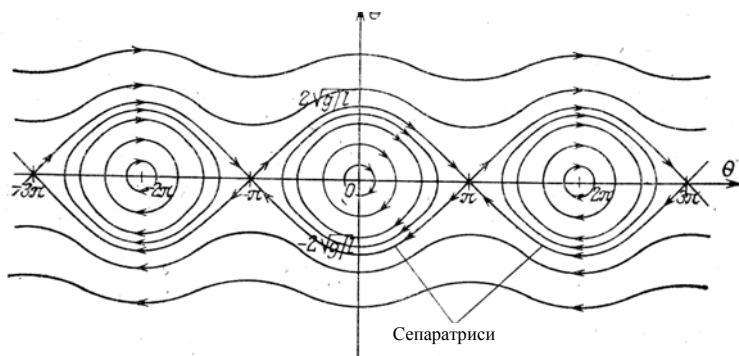


Рисунок 8 – Фазовий портрет математичного маятника без тертя. Криві на площині (θ, θ') – лінії постійної енергії маятника. Картина періодична щодо кута θ (період 2π)

Доречно зробити декілька зауважень щодо рис. 8. Коло з центром у точці $\theta=0$ (або при більш загальному підході в точці $0 \pm 2\pi n$, де n – ціле число) відповідає гармонічним коливанням, період яких у лінійному наближенні не залежить від амплітуди і

маси (так званий *ізохронізм* малих коливань). Такі коливання відповідають найменшим значенням енергії системи. На відміну від цього в *нелінійній області період коливань зростає із збільшенням їх амплітуди* (енергії). Відповідно кола переходять у овали і період починає залежати від амплітуди. Співвідношення між періодом T і енергією E у цьому випадку має вигляд

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} F\left(\frac{lE}{g}\right).$$

Тут функція $F(lE/g)$ є еліптичним інтегралом, який розходиться, коли ми наближаємося до *сепаратриси, тобто до контура енергії, що проходить через нестійкі точки рівноваги маятника* з координатами $\theta' = 0$, $\theta = \pm(2n+1)$ (верхнє положення маятника – точка R' на рис. 8). На цій сепаратрисі енергія дорівнює $2g/l$, а період – нескінченний. Це відображає той факт, що маятнику потрібно нескінченно багато часу для досягнення нестійкого стану рівноваги, коли наявна енергія в точності дорівнює енергії, яка необхідна для досягнення точки R' .

При будь-якому значенні E , що перевищує $2g/l$, коливання замінюються безперервним обертанням навколо точки 0 , при цьому існують дві можливі траєкторії, симетричні відносно осі. Вони відповідають обертанню маятника навколо точки або в одному, або в іншому напрямку.

3.5 Збереження площ у фазовому просторі

Маятник без тертя належить до класу *консервативних* (або *гамільтонових*) систем, для яких характерно збереження повної енергії. Із цієї особливості випливає дуже важлива властивість таких систем - *збереження площ у фазовому просторі*.

Для того, щоб спостерігалася сталість площ, відстань між сусідніми траєкторіями повинна залишатися майже постійною (рис. 9). Оскільки площа безлічі даних початкових умов $\delta q_i \delta p_i$, зберігається у часі, відстань між початковими точками не може зменшуватися, оскільки у протилежному разі площа зменшувалася б

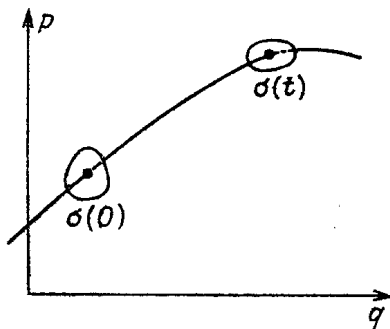


Рисунок 9 – Збереження площі у фазовому просторі (q, p) . Елемент площі $\sigma(0)$, який можна розглядати як безліч початкових умов, внаслідок руху перетворюється в інший елемент, площа якого дорівнює $\sigma(t)$. Якщо система консервативна, то елемент $\sigma(t)$ при будь-яких значеннях t має ту саму площу (але не обов'язково таку саму форму), як і початковий елемент $\sigma(0)$

з часом. Таке збереження площі може бути гарантовано одним із двох способів:

1) або елемент поверхні переноситься уздовж траєкторії, по суті, без деформації;

2) або він експоненціально подовжується з часом, наприклад, як $e^{\lambda t}$, де $\lambda > 0$ в одному напрямку, і експоненціально стискається як $e^{-\lambda t}$ у перпендикулярному напрямку. Оскільки $e^{\lambda t} e^{-\lambda t} \equiv 1$, площа в другому випадку також зберігається.

Якщо при першій гіпотезі дві траєкторії, що близькі спочатку, залишаються близькими при будь-якому часі t , то при другій гіпотезі вони прагнуть розійтися експоненціально. Підкреслимо, що, з динамічної точки зору, відмінність істотна: у першому випадку траєкторії стійкі, тоді як у другому випадку вони нестійкі, оскільки малі початкові розбіжності дуже швидко посилюються з часом.

3.6 Інваріантність рівнянь відносно обернення часу

Ще одна важлива властивість рівняння (1) полягає у тому, що на ньому ніяк не позначається зміна знака часу (заміна t на $-t$). У нашому конкретному прикладі це означає, що кінофільм про рух

маятника можна прокручувати як в один, так і в інший бік без будь-якої помітної відмінності. Саме тому кажуть, що *динаміка консервативних систем є оборотною*. Як ми побачимо далі, необоротність виникає, якщо енергія розсіваюється замість того, щоб зберігатися.

З погляду фазового простору, очевидно, що закон збереження площ залишається в силі при оберненні часу. Аналогічно, стійкі траєкторії не розходяться, тобто залишаються стійкими: незалежно від того, в якому напрямку йде час. На відміну від цього якщо площа зберігається за рахунок подовження в одному напрямку і скорочення в перпендикулярному напрямку, то *обернення часу призводить до того, що ці два напрями обмінюються характером стійкості*: спочатку стійкий напрямок (стиснення) стає нестійким (напрямом розтягування), і навпаки.

3.7 Осцилятор із загасанням

3.7.1 Дисипація енергії при терті. Рівняння для осцилятора із загасанням

Опис вільного осцилятора, наведений вище, був отриманий шляхом ідеалізації простого маятника. Зокрема ми нехтували всіма видами тертя - тертям об повітря, а також тертям в точці підвісу 0. На практиці через тертя амплітуда коливань реального маятника з часом зменшується і врешті-решт його рух припиняється. Це дуже загальне явище *розсіяння або дисипації енергії* необхідно врахувати в математичному описі коливань. Для цього рівняння (1) необхідно модифікувати, порушивши його інваріантність відносно часу, оскільки тертя врешті-решт призводить до припинення коливань.

Найпростіше всього це зробити, додавши до рівняння (1) член, пропорційний похідній якого-небудь непарного порядку, наприклад першу похідну, від кута θ . Тоді в лінійному наближенні одержуємо

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \gamma \frac{d\theta}{dt} + \omega^2\theta = 0, \quad (5)$$

де γ – коефіцієнт загасання; $\omega^2 = g/l$ – квадрат кутової швидкості.

У результаті ми одержуємо лінійаризоване рівняння маятника із загасанням, добре відомого з загального курсу фізики. Як показує дослід, це рівняння дає задовільний опис у разі тертя типу “тертя в рідині” (пропорційного швидкості). Розглянемо більш детально еволюцію енергії маятника в цьому випадку, врахувавши, що у співвідношенні (3) за припущенням необхідним для лінеаризації, $1 - \cos \theta \approx (\theta^2 / 2)$. Тоді одержимо:

$$E(\theta, \theta') = \frac{1}{2}(\theta'^2 + \omega^2 \theta^2).$$

Порівнявши це співвідношення з рівнянням (5), можна записати, що

$$\frac{dE}{dt} = -\gamma \theta'^2. \quad (6)$$

Таким чином очевидно, що енергія системи зберігається, якщо $\gamma = 0$ (тертя відсутнє), і зменшується, якщо $\gamma > 0$ (тертям знехтувати не можливо). Оскільки за визначенням $E > 0$, енергія з часом наближається до нуля. Отже, стан з нульовою енергією (стан спокою) є стійким, оскільки маятник з необхідністю еволюціонує до цього стану. У випадку якщо $\gamma < 0$, то енергія E апіорі необмежено зростає, зрозуміло, за винятком того випадку, коли початковим є стан спокою (в цьому випадку з $\theta = \theta' = 0$ впливає, що $dE/dt = 0$). Але стан спокою нестійкий, оскільки щонайменше зміщення маятника із цього стану з часом тільки посилюється.

3.7.2 Фазовий портрет руху маятника

Розв’язок рівнянь (5) у випадку слабого затухання добре відомий і має вигляд

$$\theta \approx \rho(0) \exp\left(-\frac{\gamma t}{2}\right) \cos(\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Відповідно швидкість маятника визначається співвідношенням

$$\theta' \approx -\rho(0)\omega \exp\left(-\frac{\gamma t}{2}\right) \sin(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

Фактично ми одержали параметричне рівняння траєкторії маятника на фазовій площині θ, θ' .

Це рівняння описує спіралі, що закручуються ($\gamma > 0$) або розкручуються ($\gamma < 0$), та кола ($\gamma = 0$) (див. рис.8). Відповідні фазові портрети для трьох цих випадків схематично наведені на рис 10.

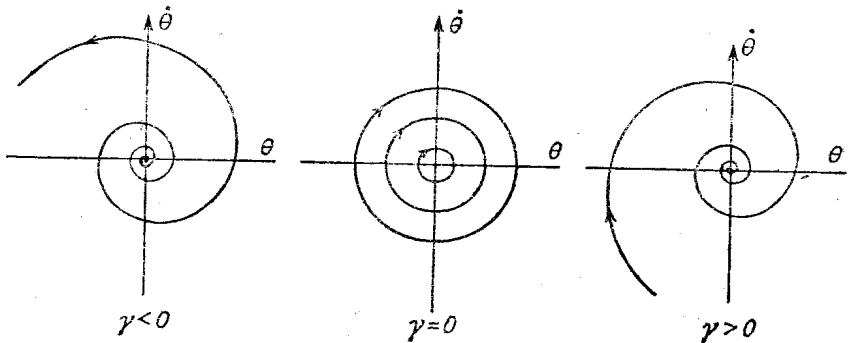


Рисунок 10 – Фазовий портрет рівняння (5) поблизу початку координат. При $\gamma = 0$ маємо маятник без тертя, тому ми одержуємо сімейство кіл з центром у початку координат. Якщо ж $\gamma \neq 0$, то при заданому γ траєкторії мають форму спіралей, що розкручуються з початку координат ($\gamma < 0$, підсилення) або сходяться до початку ($\gamma > 0$, загасання)

З рисунка зрозуміло, що при будь-якому значенні γ *початок координат є особливою точкою*, яка відповідає стаціонарному розв'язку рівняння руху. Цей стаціонарний розв'язок стійкий при $\gamma > 0$ і нестійкий при $\gamma < 0$, оскільки в першому випадку всі траєкторії сходяться до нього, а в другому – розходяться від нього. При $\gamma = 0$ говорять, що початок координат має *нейтральну стійкість*, оскільки зміщення не посилюються і не затухають з

часом.

При $\gamma > 0$ всі траєкторії на фазовій площині закінчуються на початку координат, який через це називається *точкою притягання* або *атрактором* (від «attract» – притягання, мета). Це фундаментальне поняття може бути узагальненим і на випадок більш високих розмірностей фазових діаграм (кривих, поверхонь та ін.).

3.8 Дисипативні системи

3.8.1 Істотні властивості дисипативних систем

Осцилятор із загасанням є типовим прикладом *системи, що розсіює енергію, або дисипативної системи*. Динамічні властивості таких систем значно відрізняються від властивостей консервативних систем. У *дисипативних системах, наприклад, не зберігається енергія*. З іншого боку, в певних випадках існує *функція динамічних змінних, що має назву функції Ляпунова*, вона є позитивною і монотонно зменшується з часом (обумовлюючи тим самим необоротність процесу). Однак така функція Ляпунова існує не завжди. *Дисипативні системи можуть мати набагато складніший еволюційний режим, ніж просто затухання, особливо якщо динаміка містить у собі і ефекти загасання, і механізми, що підтримують рух*. У випадку якщо існує дисипація, то рівняння руху змінюються при зміні напрямку часу, еволюція дисипативних систем не є оборотною. Нарешті, необхідно відмітити, що *площі у фазовому просторі дисипативних систем не зберігаються*.

3.8.2 Стиснення площ у фазовому просторі

У випадку дії сил тертя елемент поверхні $\delta\theta \cdot \delta\theta'$ на фазовій площині не може зберігатися. Це зрозуміло з аналізу рис.10, оскільки очевидно, що всі траєкторії, які проходять крізь нього закінчуються у початку координат. *Відповідно площа будь-якої множини початкових умов у середньому зменшується з часом* (рис.11). Цю властивість часто висловлюють, стверджуючи, що *потік у фазовому просторі стискає площі*.

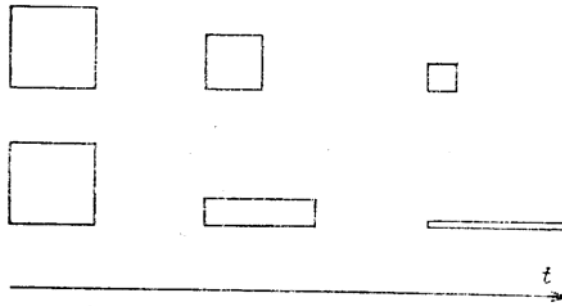


Рисунок 11 – Два різні випадки стиснення площ у фазовому просторі. У першому випадку довжина і ширина зменшуються одночасно і однаково. У другому випадку ширина зростає, але висота при цьому зменшується швидше. І в першому, і у другому випадках площа зменшується в одному і тому самому темпі. Таким чином, зменшення площі у фазовому просторі зовсім не обов'язково означає, що всі розміри області зменшуються одночасно

Таке стискання може відбуватися по-різному. Наприклад, найбільш зрозумілим є випадок, коли скорочується як довжина, так і ширина фігури. Між тим можливий і більш складний випадок, коли розбіжність траєкторій в одному напрямку компенсується їх зближенням у іншому напрямку, при цьому загальна площа фігури все ж зменшується.

3.9 Осцилятор під дією примусової сили

3.9.1 Рівняння Ван дер Поля

Рівняння (5), що описує коливання маятника за наявності тертя, не зовсім адекватно описує реальний фізичний об'єкт. Наприклад, у випадку коли $\gamma < 0$, енергія маятника необмежено зростає, що не має фізичного змісту. Іншим недоліком співвідношення (5) є те, що, якщо $\theta(t)$ є розв'язком, то оскільки це рівняння є лінійним за θ , добуток $\alpha\theta(t)$ теж має бути таким розв'язком при будь-якому дійсному значенні α . Однак коливання маятника відбуваються з заданою амплітудою, яка від θ не залежить. Отже, для випадку осцилятора з примусовою силою рівняння (5) належить змінити так, щоб:

- 1) порушити інваріантність відносно розтягування;
- 2) обмежити зростання енергії при $\gamma < 0$;
- 3) ввести безперервне джерело енергії, яке компенсує втрати на в'язке загасання при $\gamma > 0$.

Взявши ці зауваження за відправні пункти, Ван дер Поль ввів у рівняння коефіцієнт затухання, що залежить від кута θ , у вигляді

$$\gamma(\theta) = -\gamma_0 \left[1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2} \right], \quad (9)$$

де $\gamma_0 > 0$, θ_0 – вихідний кут, тоді $\gamma < 0$ при $\theta^2 < \theta_0^2$, $\gamma > 0$ при $\theta^2 > \theta_0^2$.

Підставляючи цей вираз у рівняння (5), одержимо так зване *рівняння Ван дер Поля*

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} - \gamma_0 \left[1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2} \right] \frac{d\theta}{dt} + \omega^2\theta = 0. \quad (10)$$

Воно описує поведінку осцилятора з примусовою силою, в якому *коливання з малою амплітудою підсилюються, а коливання з великою амплітудою затухають*. Корисно звести це рівняння до безрозмірного вигляду, вибираючи вираз $\theta_0\sqrt{\omega/\gamma_0}$ за одиницю амплітуди і $1/\omega$ – за одиницю часу. В результаті рівняння Ван дер Поля набуває вигляду

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} - (\varepsilon - \theta^2) \frac{d\theta}{dt} + \theta = 0, \quad (11)$$

де $\varepsilon = \frac{\gamma_0}{\omega}$.

3.9.2 Фазовий портрет рівняння Ван дер Поля

Аналіз рівняння (11) показує, що якщо параметр ε є позитивним,

то траєкторії поблизу початку координат розходяться як спіралі. Дійсно, у цьому випадку кут θ є малий і членом θ^2 можна знехтувати. Таким чином, ми одержуємо ситуацію, яка наведена на рис. 10 при $\gamma < 0$. Навпаки, вдалині від початку координат всі траєкторії прагнуть до нього, оскільки коефіцієнт загасання $\gamma(\theta)$ на достатньо великій відстані від початку координат є позитивним. Виходячи з інтуїтивних міркувань, можна припустити, що між цими крайніми випадками повинна існувати деяка замкнута траєкторія. Більш ретельне дослідження рівняння Ван дер Поля дозволяє встановити існування єдиної і стійкої замкненої траєкторії, яку Пуанкаре назвав *граничним циклом*. Усі фазові траєкторії, розміщені як всередині, так і зовні граничного циклу, асимптотично наближуються до нього (рис.12). Таким чином, перед нами *новий приклад атрактора*. Фазова траєкторія у вигляді замкненої петлі отримала назву *періодичного атрактора*, тоді як траєкторії, що закручуються до центру, називається *точковим атрактором*.

Форма граничного циклу і відповідно коливань сильно залежить від значення позитивного параметра ε у рівнянні (11). На рис. 13 зображені розв'язки цього рівняння, що випливають із заданої точки (початкової умови) в системі координат (θ, θ') і (θ, t) . Використано два значення ε : дуже мале (рис. 13 а) та набагато більше (рис. 13 б). У першому випадку граничний цикл має форму кола і коливання є *квазісинусоїдальними* (близькими до синусоїдальних). У другому випадку еволюція відбувається в двох різних масштабах; після повільного "дрейфу" відбувається різка зміна амплітуди. Така часова залежність одержала назву *релаксаційних коливань*.

Особливістю дисипативних динамічних систем є притягання усіх траєкторій, що проходять через деяку область фазового простору, до геометричного об'єкта, який називається атрактором.

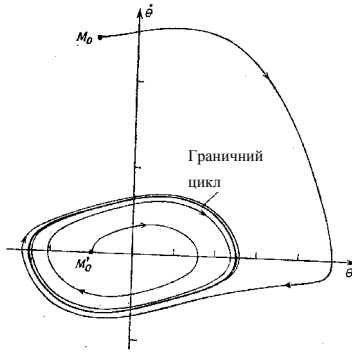


Рисунок 12 – Фазовий портрет рівняння Ван дер Поля. Один із розв'язків рівняння зображений на фазовій площині (θ, θ') замкнутою кривою – граничним циклом, до якого сходяться всі траєкторії. Були вибрані дві початкові точки: одна зовні, інша всередині циклу при $\varepsilon = 0,4$

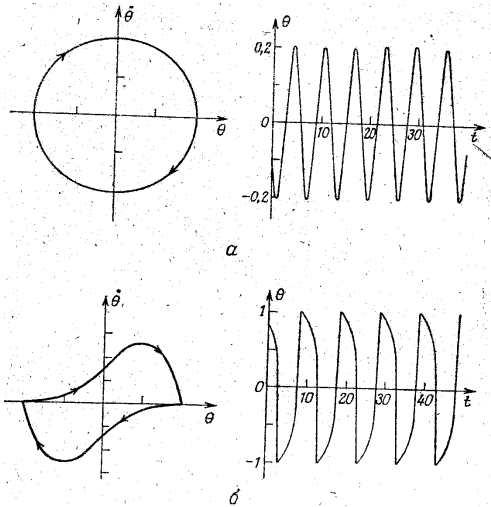


Рисунок 13 – Вплив параметра ε на вигляд циклу: при малих значеннях цього параметра ($\varepsilon = 0,01$) коливання є квазісинусоїдальними і граничний цикл мало відрізняється від кола; при значно більших значеннях параметра ($\varepsilon = 4$) граничний цикл має майже прямокутну форму. Це призводить до виникнення у коливань двох різних масштабів часу

Пояснимо це на прикладі маятника, на який діє вимушуюча сила. У такій системі енергія, що підводиться до маятника зовні, компенсує затрати енергії на тертя і таким чином розсіюється системою. Коли коливання маятника досягають такої амплітуди, що енергія, яка підводиться за цикл, у точності дорівнює енергії, що розсіюється за цей же час, установлюється стаціонарний стан. Відповідний режим є періодичним, амплітуда коливань маятника є сталою, а траєкторія у фазовому просторі є граничним циклом. У тому, що такий цикл притягує інші фазові траєкторії, можемо переконатися, дещо змістивши систему з граничного циклу. Наприклад, збуримо маятник, поштовхом відхиливши його на кут θ_1 і надавши швидкість θ'_1 . Нехай ці значення значно перевищують максимальні значення θ_m та θ'_m граничного циклу. Через деякий час дисипація енергії примусить траєкторію швидко наблизитися до граничного циклу, на якому це розсіювання енергії компенсується енергією, що підводиться до системи. Відповідно гальмування маятника, на який діє вимушуюча сила, зменшить його амплітуду і швидкість, але потім вони знову зростуть, наблизившись до граничного циклу.

За визначенням *областю притягання атрактора В* називається *безліч точок, таких, що траєкторії, які виходять з них, при $t \rightarrow \infty$ прагнуть до атрактора А* (рис. 14).

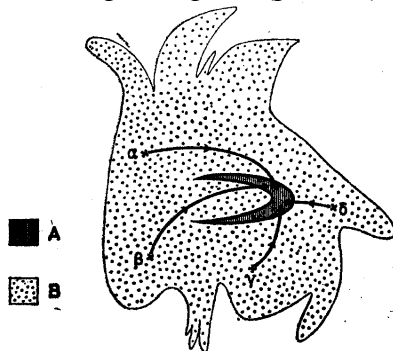


Рисунок 14 – Схематичне зображення атрактора: А – атрактор; В – його область притягання. Фазові траєкторії, що виходять з початкових точок α , β , γ і δ закінчуються на атракторі А

Ми бачимо, що атрактор A є асимптотичною межею розв'язків, початкові точки яких належать його області притягання B . Очевидно, що навіть якщо A – простий геометричний об'єкт, то B може мати дуже складну форму.

Протягом останніх років метод фазового простору використаний для дослідження безлічі складних систем. При цьому кожний раз вчені складають нелінійні рівняння, розв'язують їх чисельними методами, а комп'ютери викреслюють розв'язки у вигляді траєкторій у фазовому просторі. На своє велике здивування, дослідники встановили, що *число різних атракторів дуже обмежене. Їх форми можна класифікувати топологічно, а загальні динамічні властивості складної системи - вивести з форми атрактора.*

Всього існує *три основні типи атракторів*: точкові, що відповідають системам, які досягають стійкої рівноваги; періодичні – періодичним коливанням; і так звані *дивні атрактори*, що описують хаотичні системи.

У нелінійної системи може бути декілька атракторів різних типів, як хаотичних, або «дивних», так і нехаотичних. Всі траєкторії, що починаються в певній області фазового простору, рано чи пізно приводять до одного і того ж атрактора. Таким чином, фазовий простір нелінійної системи розбивається на декілька сфер притягання, кожній з яких відповідає її окремий атрактор.

Аналіз будь-якої динамічної системи зводиться до визначення атракторів системи і областей їх притягання, а також класифікації їх в рамках топологічних характеристик. Результатом є динамічна картина всієї системи – *фазовий портрет*.

3.10 Наслідки скорочення площ у фазовому просторі

Звернемося знову до прикладу з граничним циклом, щоб дослідити дві дуже важливі характеристики притягання до атрактора: *втрату пам'яті про початкові умови і те, що з цього впливає для розмірності атрактора.*

Для цього розглянемо безліч початкових умов на фазовій

площині (θ, θ') , що займають область, розміром Γ (рис. 15).

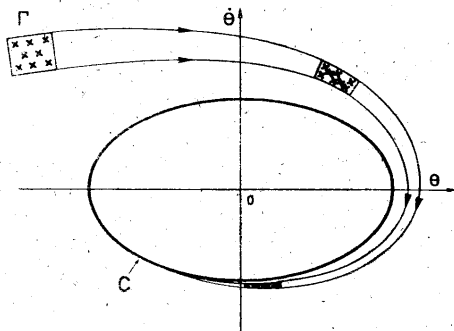


Рисунок 15 – Скорочення площі пов'язане з притяганням до атрактора. Площадка Γ , що обмежує деяку множину початкових умов при досягненні атрактора C , вироджується у відрізок кривої

Розсіювання енергії у системі призводить до скорочення площі цієї області. В результаті поверхня Γ вироджується до лінійного відрізка на аттракторі C . Таким чином, відбувається втрата інформації відносно взаємного положення точок, що спочатку належали поверхні Γ ; по досягненні атрактора інформація втрачається необоротно. Цей висновок спирається виключно на ефекти скорочення площі і одночасного існування атрактора. Отже, висновок залишається в силі незалежно від типу атрактора. Цей висновок справедливий і для аперіодичних режимів, і пов'язаних з ними атракторів.

Подібну втрату пам'яті про точні початкові умови ми продемонструємо на прикладі з маятником. Спочатку (тобто вдалині від граничного циклу) для завдання стану динамічної системи необхідні дві координати θ, θ' , а тому для опису системи необхідно двовимірний фазовий простір або поверхня. Після затухання і виходу системи на асимптотичний режим залишається одна траєкторія: крива C . Для визначення положення точки у цьому випадку достатньо однієї криволінійної координати. Цей приклад ілюструє загальний всеосяжний принцип: розмірність атрактора d завжди є меншою від розмірності фазового простору n ($d < n$), тобто є меншою від кількості ступенів вільності динамічної системи.

3.11 Дивні атрактори

Властивості атракторів задаються набором траєкторій в просторі n змінних стану, що залежать від часу. В звичайному атракторі такі траєкторії дуже прості. Вони, наприклад, визначаються наявністю замкнутих кривих - граничних циклів, або точок притягання.

Разом з тим траєкторії деяких нелінійних динамічних систем в багатовимірному фазовому просторі поведуть себе незвичайним чином. Як і в традиційному випадку, існує область, яка притягає до себе всі траєкторії з навколишніх областей, але завдяки особливим властивостям вона одержала назву «дивного атрактора Лоренца». Такі атрактори дійсно виглядають дивно, оскільки не є ні точкою, ні періодичною траєкторією, ні поверхнею; їх порівнюють іноді з поверхнею, що складається з нескінченної множини шарів. Головна ж особливість полягає в тому, що в дивному атракторі вибраний навмання розв'язок блукатиме хаотично і з часом буде достатньо близько до будь-якої його точки. Тому такі процеси одержали назву динамічного хаосу. Дивний атрактор – це математичний образ детермінованих неперіодичних процесів, для яких неможливий довгостроковий прогноз. Дивний атрактор можна розглядати як фрактальну множину, що характеризується дробовою розмірністю з $2 < D_f < 3$.

Подібні явища виявлені на всіх поверххах будови світу, починаючи з мікро- і закінчуючи мегасвітом (рис. 16).

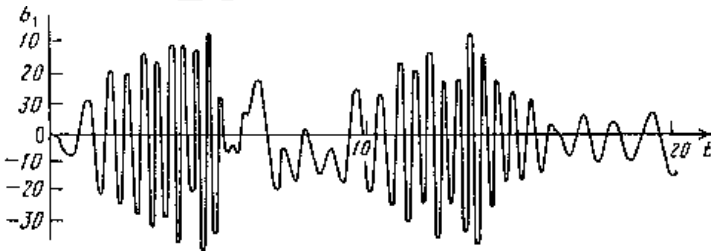


Рисунок 16 – Зміна однієї з величин, яка характеризує магнітне поле в моделі, що описує сонячну активність. Хаотичність у цій моделі призводить до "збоїв" у сонячній активності – протягом десятків років Сонце залишається спокійним. Така поведінка узгоджується з результатами спостережень Швидка розбіжність двох близьких в початковий момент часу

траекторій означає дуже велику чутливість розв'язків до малої зміни початкових умов (рис.17). Цим обумовлена велика трудність або навіть неможливість довгострокового прогнозу поведінки нелінійних динамічних систем.

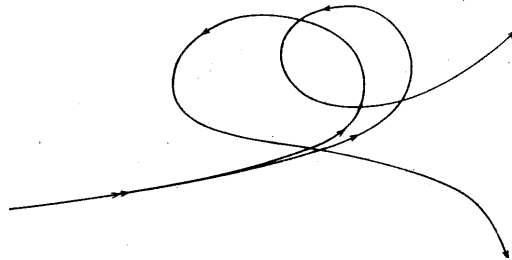


Рисунок 17 – Приклад розходження траекторій, близьких у початковий момент

На рис.18 показаний фазовий "портрет" дивного атрактора, що описує коливання, в деякій хімічній реакції, яку моделювали на комп'ютері. Цей атрактор отриманий при обробці експерименту з вивчення знаменитої коливальної хімічної реакції *Белоусова-Жаботинського* (див. нижче).

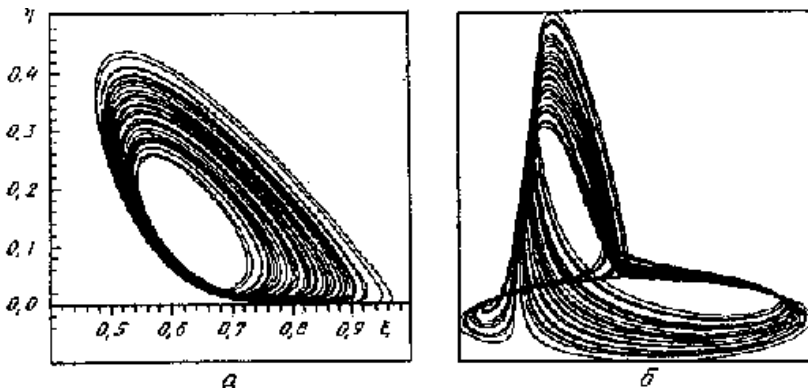


Рисунок 18 – Проекція атрактора, що отриманий при експериментальному дослідженні реакції Белоусова-Жаботинського на дві різні площини, оскільки фазовий простір цієї динамічної системи є тривимірним. Бачимо, що коливальна хімічна

реакція за певних умов може йти в хаотичному режимі

Природу динамічного хаосу легко зрозуміти, аналізуючи рисунок 18. Точка, що визначає стан системи (наприклад, концентрації хімічних реакцій), рухається по цьому атрактору. У верхній точці траєкторії вона повертатиме і рухатиметься то за лівою, то за правою "стрічкою" атрактора. Припустимо, ми розглядаємо дві системи (наприклад, одна – ідеальна модель системи, інша – сама система). Спочатку, коли точки, що визначають стан систем, рухаються близько одна від одної, за положенням однієї точки можна сказати, де перебуває інша (тут можливий прогноз). Але, починаючи з якогось моменту часу (горизонту прогнозу), одна точка повертає вліво, а інша – направо. Тепер, навіть точно знаючи положення однієї точки, ми втрачаємо можливість що-небудь сказати про іншу. *Прогноз стає неможливим принципово.*

Разом з тим, як бачимо з рис.18 у дивних атракторах є досить багато порядку. Те саме можна сказати про весь детермінований хаос. Пошуки цього порядку забрали у фізиків-фахівців з нелінійної науки – останні двадцять років. Ці пошуки дали значні результати. Наприклад, виявилось, що в природі існує всього декілька універсальних сценаріїв переходу від порядку до хаосу. Можна вивчати найрізноманітніші явища, записувати різні рівняння, але одержувати одні і ті самі сценарії розвитку подій. Це дуже дивно. Дослідники намагаються побачити за даними результатами новий, більш глибокий рівень єдності природи.

З'ясувалося, наприклад, що безліч систем нашого організму працюють в хаотичному або близькому до нього режимі. Причому часто хаос є ознакою здоров'я, а зайва впорядкованість – симптомом хвороби. Це привело до появи нових методів аналізу кардіограм і енцефалограм, міограм, нових видів діагностики технічних систем і т.ін. Хаос подарував нові способи захисту інформації, дав нові способи запису інформації і її стиснення.

Стало зрозуміло, що *порядок неможливо відділити від хаосу, а сам хаос у ряді випадків може бути як надскладна впорядкованість.*

3.12 Поняття бифуркації

Математичні методи аналізу фазових портретів складних систем засновані на новаторських працях Пуанкаре; згодом вони були розвинені і вдосконалені американським топологом Стівеном Смейлом. Смейл використовував свій метод не тільки для аналізу систем, що описуються певним набором нелінійних рівнянь, але також для вивчення того, як поведуться ці системи при невеликих змінах в їх рівняннях. Виявилось, що у міру того як параметри рівнянь повільно змінюються, фазовий портрет - тобто форми його атракторів і сфери притягання - як правило, зазнає відповідні плавні зміни, не змінюючи своїх основних характеристик. Для опису систем, в яких невеликі відхилення в рівняннях не змінюють основного характеру фазового портрета Смейл використовував термін «структурно стійких».

В багатьох нелінійних системах, проте, малі зміни в певних параметрах можуть зумовити серйозні зміни основних характеристик фазового портрета. При цьому деякі атрактори можуть зникнути або змінити свій тип, можуть також раптово з'явитися нові атрактори. Говорять, що такі системи є структурно нестійкими, а критичні точки нестійкості називають точками біфуркації (від франц. *la bifurcation* – розгалуження, вилка), оскільки в еволюції системи саме в цих місцях раптово з'являється можливість вибору, і система починає еволюціонувати в тому або іншому новому напрямі. У фізичному сенсі точкам біфуркації відповідають точки нестійкості, у яких система різко змінює характер поведінки, в ній несподівано виникають нові форми впорядкованості.

В математичному значенні, точки біфуркації відзначають якісні зміни розв'язку рівняння, яке описує складну систему, при зміні параметра рівняння. З точки біфуркації виходять декілька (дві або більше) стійких або нестійких гілок розв'язків. Подання будь-якої характеристичної властивості розв'язків як функції біфуркаційного параметра утворює біфуркаційну діаграму.

Пояснимо ці поняття, на прикладі осцилятора з примусовою силою або, точніше, рівняння (11), яке описує такий процес. Дане співвідношення будемо розглядати незалежно від фізичного значення параметра ε . При всіх значеннях (позитивних і негативних) біфуркаційного параметра ε – початок координат

$\theta = \theta' = 0$ – завжди є особливою точкою. При $\varepsilon < 0$ початок координат стійкий (і, отже, є точковим атрактором), але він стає нестійким при $\varepsilon > 0$ і переходить в інший атрактор – граничний цикл (періодичний атрактор).

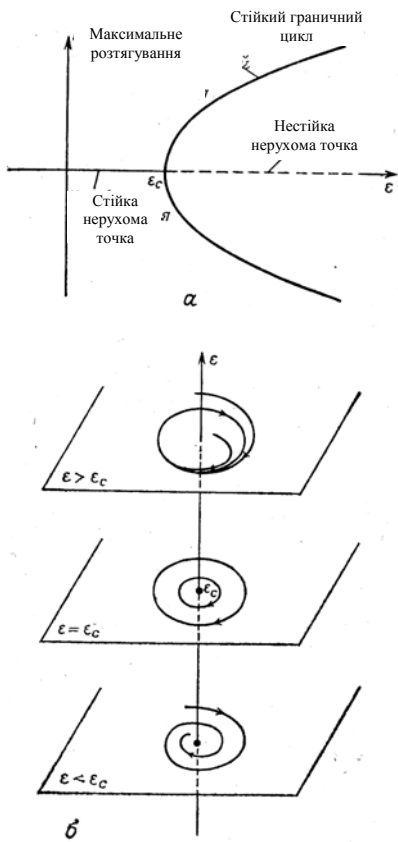


Рисунок 19 – Біфуркаційна діаграма для рівняння (11). При $\varepsilon_c = 0$ стійкий розв'язок зазнає якісних змін: замість нерухомої точки, що притягує, фазові траєкторії з'являється граничний цикл, початкова амплітуда якого дорівнює нулю (а); схематично зображені деякі фазові траєкторії у трьох випадках: $\varepsilon < \varepsilon_c$, $\varepsilon = \varepsilon_c$ та $\varepsilon > \varepsilon_c$ (б). Для зручності вісь ε вибрана вертикальною

Таким чином, при критичному значенні параметра $\varepsilon = 0$

відбувається зміна характеру стійкого розв'язку. Побудувавши графік якої-небудь типової властивості розв'язку, наприклад максимального відхилення як функцію параметра ε , отримаємо діаграму, зображену на рис. 19, а. Щоб підкреслити значення цієї біфуркаційної діаграми, на тому самому рисунку показана також форма траєкторії тіла на фазовій площині (рис. 19 б).

Нагадаємо, що при $\varepsilon = 0$ осцилятор перебуває в стані нейтральної стійкості: у фазовій площині більше немає атрактора і будь-яка початкова умова породжує свою власну траєкторію.

Оскільки типів атракторів досить небагато, *обмежена і кількість різновидів біфуркацій*; відповідно *їх можливо класифікувати топологічно, як і атрактори*. Теорію, яка дозволила класифікувати біфуркації розвинули Г.Уїтні та Рене Том, але замість терміну біфуркація вони використали термін *катастрофа*.

4 ТЕОРІЯ КАТАСТРОФ

Виникнення дисипативних структур у природі має пороговий характер. Нерівноважна термодинаміка пов'язала цей пороговий характер з нестійкістю, показавши, що нова структура завжди є результатом розкриття нестійкості в результаті флуктуації. Втрата системою стійкості називається *катастрофою*. Точніше, - *ця стрибкоподібна зміна, що виникає при плавній зміні зовнішніх умов*. Математична теорія, що аналізує поведінку нелінійних динамічних систем при зміні їх параметрів, називається *теорією катастроф*.

Основою теорії катастроф є нова область математики - *теорія особливостей гладких відображень*, що є далеким узагальненням *задач на екстремум в математичному аналізі*. Вона започаткована американським математиком Г.Уїтні у 1955 р. Після робіт Р.Тома почався інтенсивний розвиток як самої теорії катастроф, так і її численних додатків. *Значення елементарної теорії катастроф полягає в тому, що вона зводить величезну різноманітність ситуацій, які спостерігаються у природі до невеликої кількості стандартних схем, які можна детально дослідити раз і назавжди*.

Теорія катастроф досліджує динамічні системи, які становлять широкий клас нелінійних систем і описуються рівняннями вигляду:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = f_i(x_i, c_\alpha), \quad (13)$$

де x_i – змінні, що характеризують стан системи; c_α – набір параметрів задачі (*керуючі параметри*). В елементарній теорії катастроф розглядається окремий випадок динамічних систем: вважається, що для них існує потенціальна функція-аналог потенціалу електричного поля:

$$f_i = \frac{\partial}{\partial x_i} U(x_i, c_\alpha), \quad (14)$$

а сама система має стани рівноваги ($x_i=0$). Задача полягає в дослідженні зміни станів рівноваги $x_i(c_\alpha)$ потенціальної функції $U(x_i, c_\alpha)$ при зміні керуючих параметрів.

*Елементарна теорія катастроф фактично є узагальненням задач на мінімум і максимум в математичному аналізі. Для функції однієї змінної її поведінка визначається критичними точками – максимумами і мінімумами. Ці точки відповідають рівності нулю першої похідної при другій похідній, що є відмінною від нуля (*невироджені критичні точки*). Сама функція заміною змінних поблизу критичної точки може бути зведена до вигляду*

$$U = \pm \tilde{x}^2 + c_\alpha,$$

де нова функція є гладкою (тобто має похідні будь-якого порядку).

Аналогічно процедура для критичних точок може бути виконана і у багатовимірному випадку, тоді в околиці невірродженої

критичної точки (для неї перша похідна $\frac{\partial U}{\partial x_i}$ дорівнює нулю, а багатовимірний аналог другої $U_{ij} = \frac{\partial^2 U}{\partial x_i \partial x_j}$, $\det U_{ij} \neq 0$ нулю не дорівнює) потенціальна функція зводиться до квадратичної форми:

$$U = \sum_i \lambda_i(c_\alpha) \tilde{x}_i^2.$$

Це співвідношення може бути також перетворене, до вигляду

$$U = \pm x_1'^2 \pm x_2'^2 \pm \dots \pm x_n'^2 + c_\alpha.$$

Невироджені критичні точки визначають максимуми, мінімуми і сідлові точки різного типу потенціальної функції і дають можливість одержати якісну картину її поведінки в багатовимірному просторі. Так, двовимірна функція $U(x_1, x_2)$ нагадує рельєфну карту поверхні землі: вершини гір і сідла зв'язані хребтами, ту є озерні западини і сідлоподібні долини. Діагоналізація квадратичної форми U_{ij} дає можливість знайти напрями максимального градієнта функції.

Якщо двовимірний потенціальний рельєф наповнити водою, то вона збереться в озера, розміщені на дні долин. Мінімум, який притягає воду, фактично є атрактором. Атрактори розділяються сідлами, хребтами, вершинами, які створюють границі розділу між різними басейнами притягання. Типова картина рельєфу потенціальної функції, що має лише невироджені критичні точки, наведена на рис. 20.

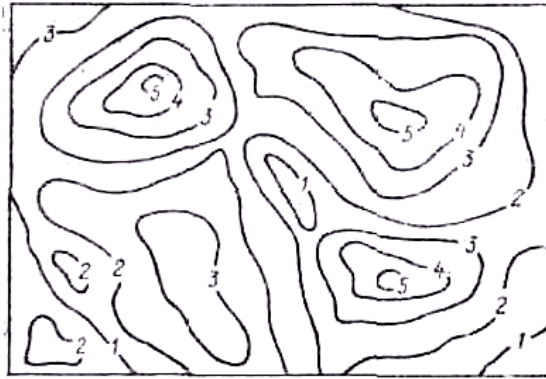


Рисунок 20 – Потенціальний рельєф у просторі змінних стану

Розглянута вище проста якісна картина багатовимірного рельєфу істотно змінюється за наявності вироджених критичних точок, для яких одне або декілька власних значень $\det U_{ij}$ дорівнює нулю. Рівність нулю $\det U_{ij} = 0$ виникає при деяких певних значеннях керуючих параметрів c_α . Якщо при зміні величин c_α система проходить через вироджену критичну точку, то топографія її докорінно змінюється. Замість знайомого пейзажу з хребтами і долинами виникає якісно нова картина, тобто ми опиняємося немов би в зовсім іншому світі. В цьому значенні про перехід через особливу точку говорять як про катастрофу. При наближенні до границі переходу певні критичні точки рельєфу зближуються, а потім зливаються.

Безліч точок c_α , що відповідають функції з $\det U_{ij} = 0$, розбивають простір керуючих параметрів на відкриті області. Кожній з цих областей відповідають якісно відмінні рельєфи. При перетині границі, що розділяє області, – так званої *сепаратрисі*, яка є геометричним місцем особливостей, відбувається якісна стрибкоподібна зміна – катастрофа станів системи.

Значення підходу, що розвивається, полягає в знаходженні вироджених критичних точок (поверхонь), що відповідають якісній зміні в топографії сімейств потенціальних функцій і виконанню поблизу них лінійного аналізу стійкості.

В околі вироджених, особливих точок відповідним перетворенням координат потенціальна функція може бути подана у вигляді:

$$U = \text{Cat}(x_i, c_\beta) + \sum_{j=l+1} \lambda_j(c_\alpha) x_j^2.$$

Тут l змінних, що відповідають нульовим власним значенням матриці U_{ij} , є аргументами функції катастрофи $\text{Cat}(x_i, c_\beta)$, яка залежить також від керуючих параметрів. Залежність потенційної функції від решти $(n-1)$ змінних, що відповідають відмінним від нуля власним значенням, подається, як і раніше, квадратичною формою.

У результаті аналізу виявилось, що функції $\text{Cat}(x_i, c_\beta)$ можна привести до певного канонічного вигляду. Класифікація особливостей потенціальних функцій (катастроф) була проведена В. І. Арнольдом.

З'ясувалося, що для однієї або двох змінних і числа керуючих параметрів, що не перевищує п'яти, є сім типів елементарних катастроф. Для кожного типу катастроф розглядається поверхня, що залежить від n_j змінних стану і n_a керуючих параметрів в просторі n_i+n_a вимірювань. Поверхня найпростішої катастрофи з однією змінною стану і одним керуючим параметром наведена на рис. 27 а. Вона має вигляд складки на тканині і називається *катастрофою складки*. Функція катастрофи в цьому випадку задається канонічною формою

$$\text{Cat}(x_i, c_\beta) = \frac{1}{3} x^3 + cx.$$

Відповідні криві для фіксованих значень параметра c наведені на рис. 21 а. При $c > 0$ всі криві якісно подібні – вони не мають критичних точок. Всі криві з $c < 0$ також подібні і мають дві критичні точки. Точка $c = 0$ в просторі керуючих параметрів є сепаратрисою (рис. 21 в). Катастрофи складки з'являються в моделях, які описують релаксаційні

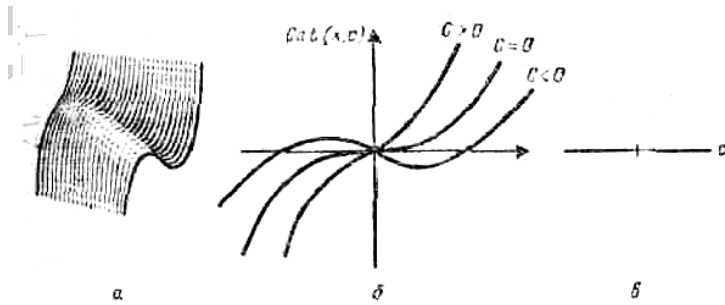


Рисунок 21 – Катастрофа складки: а – поверхня катастроф; залежність функції катастрофи від змінної стану

коливання, схеми тригерів, навантажені арки, різні дисипативні структури.

$$\text{Функція катастрофи складки } Cat(x_i, c_\beta) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx$$

залежить від однієї змінної стану і двох керуючих параметрів.

На рис. 22 показана сепаратриса катастрофи складки. Вона розділяє площину керуючих параметрів на дві відкриті області, що являють собою функції з однією і трьома критичними точками. Лінії сепаратриси мають двічі вироджені точки, а точка перетину - тричі вироджена. На рис. 22 зображені також потенціальні функції, що відповідають деяким точкам площини керуючих параметрів.



Рисунок 22 – Катастрофа складки. Площина керуючих параметрів

Аналогічно, хоча і дещо більш громіздко, виглядає опис решти п'яти типів елементарних катастроф.

Значення елементарної теорії катастроф полягає в тому, що вона зводить величезне різноманіття ситуацій, які спостерігаються на практиці, до невеликої кількості стандартних схем, які можна детально дослідити раз і назавжди.

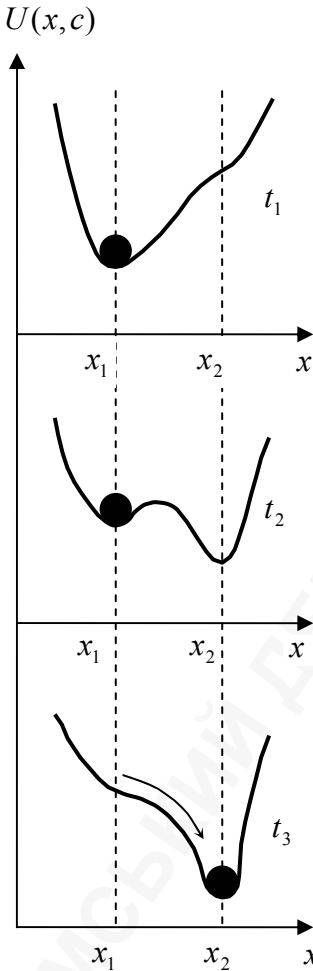


Рисунок 23 – Зміна потенціальної функції $U(x_i, c_\beta)$ з часом

Зараз теорія катастроф широко застосовується в механіці конструкцій, метеорології, аеродинаміці, оптиці, теорії кооперативних явищ, квантовій динаміці. Але головне полягає в тому, що ця теорія підводить ефективну стандартну базу під опис якісних змін в нелінійних рівняннях, що моделюють системи, далекі від рівноваги.

Теорія катастроф визначає область існування різних структур, границі їх стійкості. При цьому вона описує лише статичну картину, оскільки з самого початку з розгляду були виключена залежність вихідної функції від часу, тобто зміни динамічного характеру. Безпосередній аналіз еволюції системи виходить за межі теорії катастроф. Для вивчення динаміки систем її необхідно доповнити положеннями про те, яким чином нові розв'язки рівняння чи системи рівнянь відокремлюються від деякого відомого розв'язку при зміні керуючого параметра. Це задача теорії біфуркацій.

Зміна керуючого параметра може викликати суттєві зміни (катастрофічний стрибок) змінних

стану. Перехід з одного локального мінімуму в інший виявляється у різкому стрибку змінних стану за часовою шкалою.

Отже, стан фізичної системи, що описується потенціалом $U(x_i, C_a)$, задається точкою (x_i) , в якій потенціал має мінімум. Зміна зовнішніх умов приводить до зміни керуючих параметрів, що, у свою чергу, впливає на вигляд потенціальної функції $U(x_i, C_a)$. Глобальний мінімум, що визначав стан системи, може стати метастабільним локальним мінімумом або навіть зовсім зникнути (рис.23). При цьому система повинна перескочити з одного локального мінімуму в інший. Момент переходу залежить від властивостей системи і рівня флуктуацій.

В реальних умовах, наприклад, при поглибленні нерівноважності у *відкритих системах* виникає певна послідовність біфуркацій, одна структура заміняється іншою. Такі послідовності біфуркацій, маючи ряд загальних особливостей, можуть відбуватися за різними сценаріями. Типовим і характерним зразком такого сценарію є розвиток турбулентності у рідині, що характеризується цілим рядом послідовних біфуркацій, які призводять до надзвичайно складного квазіперіодичного її руху. У результаті виникає динамічний хаос.

5 ТЕРМОДИНАМІКА ВІДКРИТИХ СИСТЕМ

5.1 Труднощі класичної термодинаміки ізольованих систем

Люди дуже давно помітили різочу асиметрію процесів деградації і розвитку у живій і неживій природі. В класичній науці XIX ст. панувало переконання, що матерії властива тенденція до руйнування будь-якої впорядкованості, прагнення до початкової рівноваги. В енергетичному значенні це означає повну нерегульованість системи або хаос. Такий погляд на речі сформувався під впливом *класичної рівноважної термодинаміки*. Саме вона вивчається у традиційному курсі загальної фізики.

Класична термодинаміка, як добре відомо, вивчає процеси взаємоперетворення різних видів енергії у ізольованих системах. Нагадаємо, *що ізольованими або замкненими називаються системи, які не обмінюються енергією із зовнішнім середовищем*. Класичною термодинамікою було встановлено, що взаємне

перетворення тепла (Q) і роботи (A) нерівноправні. Робота може повністю перетворюватися на тепло за допомогою тертя або інших способів, а ось тепло повністю перетворити на роботу принципово неможливо. Це означає, що у взаємних перетвореннях одних видів енергії в інші існує виділена природою спрямованість. Напрямок можливих процесів у природі визначається відомим другим началом (законом) термодинаміки, яке у формулюванні німецького фізика Р. Клаузіуса звучить так: *“теплота не може переходити самовільно від тіла з нижчою температурою до тіла з вищою температурою”*.

Закон збереження і перетворення енергії (перше начало термодинаміки), в принципі, не забороняє такого переходу, необхідно лише щоб зберігалася повна енергія системи. Але реально процес переходу теплоти від більш нагрітих до менш нагрітих тіл ніколи не відбувається. Цю односторонність, однасторонність перерозподілу енергії в ізольованих системах і констатує друге начало термодинаміки. Разом з формулюванням цього закону термодинаміки ввела у науковий оборот ідею *необоротних процесів – поняття “стріли часу”*. Згідно з другим началом термодинаміки, деяка частина механічної енергії системі завжди розсіюється у вигляді тепла і тому не може бути відновлена. *Звідси всі процеси у природі мають визначений напрямок розвитку, обернені процеси неможливі*.

Для визначення напрямку процесів, що відбуваються у природі, у термодинаміці було введено поняття ентропії (S). *Під ентропією розуміють міру безладдя системи*. Більш точне формулювання другого начала термодинаміки з використанням цього поняття має такий вигляд: при довільних процесах в системах, що мають сталу енергію, ентропія завжди зростає ($\Delta S \geq 0$). Тобто, будь-які замкнені системи рухаються до стану з найбільшою ентропією. Таким чином, ентропія для таких систем поводить себе як аттрактор!

Фізичне значення зростання ентропії зводиться до того, що *ізольована система, яка складається з деякої кількості частинок прагне перейти в стан з найменшою впорядкованістю їх руху*. Це і є найпростіший стан системи, або термодинамічна рівновага. *Максимальна ентропія означає, що рух частинок системи є*

хаотичним.

Загальний висновок, що впливає з аналізу другого начала термодинаміки для людства невтішний: необоротна спрямованість процесів перетворення енергії в ізольованих системах рано чи пізно призведе до перетворення всіх її видів у теплову енергію. Ця енергія розсіється, тобто в середньому рівномірно розподілиться між елементами системи, що і означатиме термодинамічну рівновагу. Якщо Всесвіт замкнутий, то його чекає саме така незавидна доля (так звана гіпотеза *теплової смерті Всесвіту*). З хаосу, як стверджували стародавні греки, він народився, в хаос же, за припущенням класичної термодинаміки, і повернеться.

Разом з тим виникає цікаве питання: якщо Всесвіт еволюціонує тільки до хаосу, то як він зміг виникнути і організуватися до нинішнього впорядкованого стану? Відповіддю на це питання класична термодинаміка не задавалася, бо сформувалася в епоху, коли домінували погляди про стаціонарний характер Всесвіту. У ХІХ ст. єдиним німим докором класичній термодинаміці була дарвінівська теорія еволюції. Адже процес розвитку рослинного і тваринного світу, що передбачувався нею, характеризувався безперервним ускладненням, наростанням організації і порядку. Жива природа всупереч другому началу термодинаміки чомусь прагнула геть від термодинамічної рівноваги і хаосу. Спостерігалася очевидна невідповідність законів розвитку неживої і живої природи.

Після заміни моделі стаціонарного Всесвіту на модель, що передбачала його розвиток (початок ХХ ст.), з якої впливало наростаюче ускладнення організації матеріальних об'єктів природи – невідповідність існуючих законів реальності стала ще більш очевидною. Адже якщо принцип зростання ентропії такий універсальний, як же могли виникнути такі складні структури? Випадковим “збуренням” в цілому рівноважного Всесвіту їх не пояснити. Стало очевидно, що для збереження несуперечності загальної картини світу необхідно постулювати *наявність у природі в цілому не тільки руйнівної, але і творчої тенденції. Матерія здатна рухатися у бік, протилежний термодинамічній рівновазі, самоорганізовуватися і самоускладнюватися.* Подібні процеси у природі розвиваються у так званих *відкритих системах, які*

обмінюються матерією, енергією або інформацією із зовнішнім середовищем. Дослідження таких систем почалося досить недавно, так, тільки у 40-х роках ХХ століття, з'явилися роботи з термодинаміки відкритих систем біля точки рівноваги, синергетика ж як наука про відкриті системи, що розміщені далеко від стану рівноваги, виникла лише у 80-х роках.

5.2 Термодинаміка відкритих систем біля стану рівноваги

Термодинамічний підхід до опису відкритих систем вперше розвинуто у роботах бельгійського фізика російського походження, директора Міжнародного інституту фізики і хімії в Брюсселі, академіка Іллі Пригожина. У подальшому він разом з американським професором хімії Л. Онзагером та французьким фізиком професором де Дондье за роботи з термодинаміки необоротних процесів та їх використання в хімії і біології отримали Нобелівську премію 1977 року.

Автори розглянули процеси, що можуть відбуватися у відкритих системах. Нагадаємо, що всі системи в природі поділяються на *ізолювані* і *відкриті*. Ізолювані системи не обмінюються з навколишнім середовищем ні матерією, ні енергією, ні інформацією, тоді як для відкритих систем цей обмін є суттєвим. Значною мірою ізолювані системи – це ідеалізація, яка використовувалася на початкових етапах вивчення навколишнього світу. В *природі таких систем практично немає*, хоча класична термодинаміка вивчала саме ці ідеальні моделі.

При описуванні відкритих систем вчені звернули увагу на особливості поведінки їх ентропії. У загальному випадку в таких системах відбувається вироблення ентропії у самій системі $\Delta_i S$ та обмін ентропією з зовнішнім середовищем $\Delta_e S$. Отже, загальну зміну ентропії відкритої системи ΔS можна подати у вигляді

$$\Delta S = \Delta_i S + \Delta_e S. \quad (12)$$

У цьому виразі використані позначення авторів. Вибір позначень $\Delta_e S$ і $\Delta_i S$ повинен нагадувати читачу, що перший член

належить до обміну енергією (англійською *exchange* - *e*) із зовнішнім середовищем, а другий - до необоротних процесів усередині (*inside* - *i*) системи. Незвичайним є написання індексів біля символу Δ , мабуть, цим автори хотіли підкреслити неадекватність даного процесу.

Другий закон термодинаміки стверджує, що знак вироблення ентропії завжди позитивний, тобто $\Delta_i S \geq 0$, одночас знак обміну ентропією може бути як позитивним (при притоці ентропії з навколишнього середовища), так і негативним (при відтоку ентропії з системи в навколишнє середовище). Покажемо, що можливий випадок, коли *ентропія системи буде зменшуватися*, тобто якщо $\Delta S < 0$!

З аналізу співвідношення (12) очевидно, що можливі чотири ситуації.

Ситуація 1 Нехай відбувається надходження ентропії з навколишнього середовища у систему, тоді $\Delta_e S > 0$. Оскільки $\Delta_i S$ завжди позитивно, то їх сума теж позитивна, отже:

$$\Delta_e S > 0, \quad \Delta_i S \geq 0, \quad \Delta S > 0.$$

Ситуація 2 У разі відтоку ентропії у зовнішнє середовище, $\Delta_i S < 0$, при цьому абсолютна величина цього параметра може бути меншою від вироблення ентропії у системі $|\Delta_e S| < \Delta_i S$. Отже,

$$\Delta_e S < 0, \quad |\Delta_e S| < \Delta_i S, \quad \Delta_i S + \Delta_e S = \Delta S > 0$$

і величина ΔS є позитивною.

Ситуація 3 У разі негативного відтоку ентропії з системи в навколишнє середовище, $\Delta_e S < 0$. Якщо абсолютна величина цього параметра дорівнює виробленню ентропії в системі $|\Delta_e S| = \Delta_i S$, одержимо

$$\Delta_e S < 0, \quad |\Delta_e S| = \Delta_i S, \quad \Delta_i S + \Delta_e S = \Delta S = 0.$$

Як бачимо загальна ентропія системи не змінюється.

Ситуація 4 Нехай відбувається відтік ентропії з системи в оточуюче середовище, $\Delta_e S < 0$, але його абсолютна величина є більшою від вироблення ентропії в системі $|\Delta_e S| > \Delta_i S$. Отже, в даному випадку

$$\Delta_e S < 0, \quad |\Delta_e S| > \Delta_i S, \quad \Delta_i S + \Delta_e S = \Delta S < 0$$

і загальна ентропія системи ΔS виявляється негативною.

Таким чином, з ситуації 4 бачимо, що у *відкритих системах можлива негативної зміна ентропії*, тобто сама ентропія зменшується!

Нагадаємо, що збільшення ентропії приводить до наближення системи до найменш впорядкованого стану, тоді зменшення ентропії може розглядатися як рух системи від хаосу до порядку. Це означає, що в *хаотичній системі можливо самодовільне (спонтанне) виникнення порядку*. Це принципово новий висновок, що відкриває цікаві перспективни в дослідженні еволюції відкритих систем.

Відтік ентропії з системи у зовнішнє середовище іноді подають як витягання з середовища негативної ентропії (іноді її називають *негатропією*). Це приводить до зменшення хаосу в системі, виникненню впорядкованості. Інакше кажучи, для самоорганізації системи, повинен виникнути своєрідний «насос», що викачує ентропію з системи.

Отже, в процесі еволюції у відкритих системах з нерегульованих станів можуть виникати впорядковані. Цей висновок суперечить здоровому глузду і дотепер не зрозумілий багатьом представникам науки, не говорячи вже про студентські маси.

Зростання впорядкованості системи, процес структуроутворення відповідає терміну онтогенез (від грец. *ontos* суще, *genesis* - походження). Різноманіття форм, що при цьому виникає, описується терміном *морфогенез* (від грец. *morphe* - форма). *Онтогенез, звичайно, супроводжується морфогенезом*. Ці процеси пов'язані з відтоком ентропії з системи, роботою «ентропійного насоса». Доведено, що *це загальний закон природи*,

який може застосовуватися до онтогенезу ембріона, виникненню зірок та будь-яким іншим процесам у відкритих системах.

У ході розвитку нерівноважного процесу при деякому критичному значенні зовнішнього потоку енергії або речовини виникає нестійкий стан, в результаті можуть з'явитися нові форми і структури. Це і є самоорганізація, вона властива так званим *синергетичним системам*.

6 СИНЕРГЕТИКА

6.1 Основні поняття синергетики

Теорія самоорганізації складних систем сьогодні розвивається за трьома основними напрямками: *синергетика* (Р. Хакен), *нерівноважна термодинаміка* (І.Р. Пригожин) та *теорія катастроф* (Г.Уїтні, Т.Рене). Загальне значення комплексу синергетичних (термін Р. Хакена) ідей, які розвивають ці напрямки, полягає в такому: *процеси руйнування і творення, деградації і еволюції у Всесвіті рівноправні; процеси творення (наростання складності і впорядкованості) мають єдиний алгоритм, незалежно від природи систем, в яких вони відбуваються*. Таким чином, *синергетика* (слово походить від грецьких слів "разом" і "дію" і означає сумісну, злагоджену дію) претендує на відкриття універсального механізму, за допомогою якого здійснюється самоорганізація як в живій, так і в неживій природі. *Під самоорганізацією при цьому розуміється спонтанний перехід відкритої нерівноважної системи від менш складних і впорядкованих форм організації до більш складних і впорядкованих*. Розширене визначення синергетики можна дати таким чином.

Синергетика є сучасною теорією еволюції великих, надскладних, відкритих, термодинамічно нерівноважних, нелінійних динамічних систем, що володіють зворотним зв'язком і існують квазістаціонарно лише за умов постійного обміну речовиною, енергією і інформацією із зовнішнім середовищем. До таких систем належать: Всесвіт, природа, людське суспільство як вища форма і продукт матеріальної та духовної культури, що створена людством та ін. До цього переліку входять і нескінченно різноманітні підсистеми названих систем, що характеризуються (на своїх рівнях) синергетичними ознаками.

Процес самоорганізації (виникнення упорядкованих структур) відбувається як ми бачимо не у будь-якій макроскопічній системі. *Самоорганізація можлива за таких умов: система повинна бути відкритою і нерівноважною; у ній повинна бути стохастичність; вона повинна бути нестійкою відносно до слабких збурень і нелінійною.* Сильніше всього нелінійність виявляється у масових, кооперативних явищах, де погоджено (*кооперативно, когерентно*) діє значна частина учасників процесу.

Математичною моделлю такої динамічної системи є нелінійні диференціальні рівняння. Особливість їх як ми з'ясували, полягає у тому, що вони мають декілька якісно різних розв'язків. Оскільки ці розв'язки визначають еволюцію даної системи, то фізичне значення їх множинності полягає в тому, що динамічна система виявляється, як кажуть, у *стані відкритого майбутнього*. Завжди реалізується лише одна альтернатива з декількох можливих, але яка саме – вирішує випадок, тобто *дія дуже малої флуктуації динамічної змінної або фізичного параметра реальної системи*. Це пов'язано з тим, що при певних значеннях параметрів система втрачає стійкість, робиться чутливою навіть до нескінченно слабкої дії. Можна образно сказати, що за даних умов система перебуває на роздоріжжі шляхів в майбутнє. Зміна кількості (або стійкості) рішень є *біфуркацією (катастрофою)*.

Фактор, що виступає в ролі флуктуації (*ініціатора*), чие втручання у момент нестійкості визначає долю подальшої еволюції системи, називають *реплікатором* (від латинського – “розгортання, створення собі подібної структури”). Можна сказати: *реплікатор – це те, що виділяє даний випадок з безлічі інших флуктуацій або шумів, перетворюючи його на “подію”, що реалізується у кожному конкретному випадку*. Наприклад, у генетиці реплікатором є ген, в лазері – квант випромінювання, випущений у ході спонтанного випромінювання та ін. *Реплікатор стає лідером процесу самоорганізації і відбувається відтворення (реплікація) його індивідуальних характеристик іншими учасниками процесу, формування упорядкованих структур. У результаті саме його характеристики закріплюються в поведінці системи.*

Традиційно, вивчення властивості об'єктів дослідники починають з аналізу, тобто розкладання їх на окремі частини – підсистеми. Зрозумівши, як “працюють” ці окремі частини, вони

намагаються пояснити властивості всього об'єкта в цілому (синтез), розглядаючи його як просту суму складових. Такий підхід знайшов широке розповсюдження у науці і одержав назву *редукціонізму*. Проте не завжди властивості повної системи можна пояснити на основі простої суперпозиції властивостей окремих її частин. Як правило, окремі підсистеми взаємодіють одна з одною, іноді така взаємодія навіть виглядає цілеспрямованою. При цьому у системи виникають нові властивості, які якісно відрізняються від властивостей окремих підсистем. *Основне завдання синергетики – розкрити загальні принципи, за якими окремі підсистеми формують макроскопічні властивості повної системи.* Ця програма охоплює широке коло явищ, оскільки як підсистеми можуть бути атоми, молекули, клітинки, комп'ютери і навіть людина. Важливо, щоб ці підсистеми були відкритими та обмінювалися енергією, інформацією та речовиною із зовнішнім середовищем.

6.2 Самоорганізація у природі

Розглянемо деякі приклади самоорганізації в різних природних системах. У хімії відомі, так звані хімічні годинники. За певних умов деякі хімічні реакції супроводжуються періодичними змінами концентрацій реагентів: з часом один реагент замінюється іншим, потім знов відновлюється і знову зникає. Виникає періодичний хімічний процес у просторі та часі, який називають *реакцією Белоусова–Жаботинського*. При цьому утворюються структури подібні, наприклад, наведеним на рис. 24.

Іншим прикладом самоорганізації є виникнення концентричних і спіральних хвиль в агрегуючих популяціях живих клітинок (рис. 25 а). Коли клітинки починають голодувати, вони періодично виділяють спеціальну сигнальну речовину. Інші клітинки, прийнявши сигнал, починають рухатися в область підвищеної концентрації цієї речовини. У результаті виникає розподіл густини клітинок, що нагадує хвильові картини в реакції Белоусова–Жаботинського.

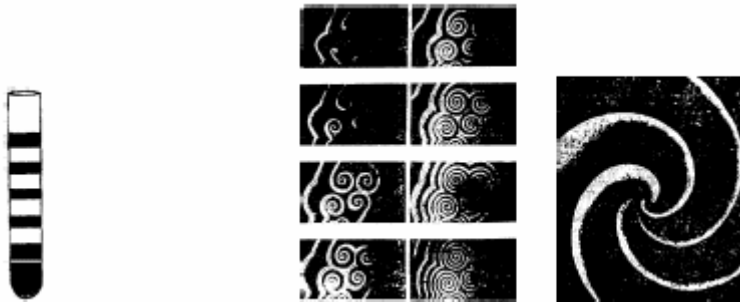


Рисунок 24 – Виникнення просторових структур в реакції Белоусова–Жаботинського

Колективна взаємодія дозволяє співтовариству клітинок контролювати велику територію, в результаті формується своєрідний багатоклітинний організм (до 105 клітинок).

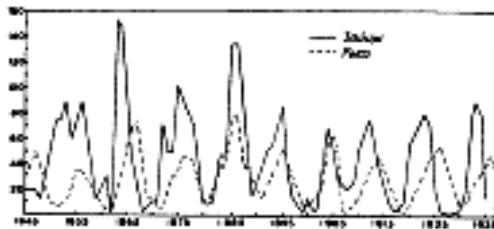


Рисунок 25 – Концентричні і спіральні хвилі популяцій клітинок *Dictyostelium discoideum*, що взаємодіють між собою на поверхні агару. Клітинки, що рухаються до центра амеби, виглядають як блискучі, а нерухомі – як темні смужки (а); зміна кількості рисей і зайців-біляків у природі (б)

Таким чином, у відповідь брак їжі в системі відбувається перехід до нового рівня організації, яка характеризується злагодженою поведінкою великої кількості клітинок. Це дозволяє організму гнучко реагувати на несприятливі зміни середовища.

Відомо, що кількість видів також схильна до часових коливань. Наприклад, кількість популяцій зайців і рисей залежить від їх співвідношення. Збільшення кількості хижаків-рисей

призводить до зменшення кількості жертв-зайців, і навпаки (рис.25 б). Не має сумнівів, що динаміка різноманітних популяцій також може бути пояснена на основі синергетики.

Типовим об'єктом синергетики є лазер. Це сильно нерівноважна система. Перехід від випромінювання лампи до випромінювання лазера є яскравий приклад самоорганізації: до порогу виникнення лазерної генерації всі атоми випускають випромінювання незалежно один від одного (випадково, некорельовано). Їх випромінювання можна наочно подати як випадковий набір окремих хвильових цугів (рис.26 а). Вище за деякий поріг (порог генерації) всі атоми починають випромінювати випромінювання однаково або *корельовано* (рис.26 б). При генерації ультракоротких імпульсів (10^{-12} с) атоми також випромінюють випромінювання скорельовано, як показано на рис.25 в.

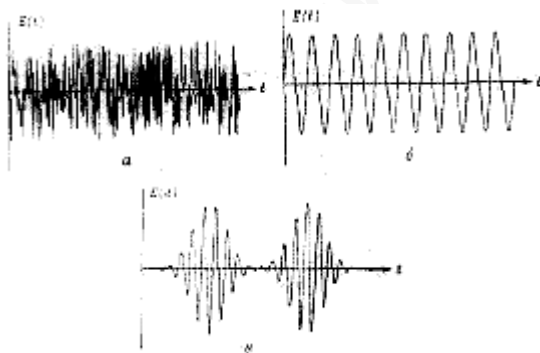


Рисунок 26 – Залежність напруженості поля $E(t)$ від часу t для випромінювання лампи (а); залежність напруженості поля $E(t)$ від часу t для випромінювання лазера (б); залежність напруженості поля $E(t)$ від часу t для ультракоротких імпульсів лазерного випромінювання (в)

Ще одним прикладом розвитку макроскопічних систем може бути еволюція суспільства від аграрного до індустріального і інформаційного.

Синергетика стверджує, що розвиток відкритих і сильно нерівноважних систем йде шляхом наростаючої складності і впорядкованості. В циклі розвитку такої системи завжди спостерігаються дві фази:

1) період плавного еволюційного розвитку, з добре передбаченими лінійними змінами, що призводить у результаті систему до деякого нестійкого критичного стану;

2) вихід з критичного стану одномоментно, стрибком і перехід в новий стійкий стан з більшою мірою складності та впорядкованості.

Важлива особливість другої фази полягає в тому, що перехід системи в новий стійкий стан неоднозначний. Система, що досягла критичних параметрів, із стану сильної нестійкості як би “звалюється” (точка *біфуркації*) в один з багатьох можливих, нових для неї стійких станів. У цій точці еволюційний шлях системи розгалужується, і яка саме гілка розвитку буде вибрана - вирішує випадок! Але після того, як “вибір зроблений”, і система перейшла в якісно новий стійкий стан, назад повернення немає. *Цей процес є необоротним відносно часу.* Звідси випливає, що *розвиток таких систем має принципово непередбачуваний характер.* Можна прорахувати варіанти можливих шляхів еволюції системи, але який саме буде вибраний - однозначно спрогнозувати неможливо.

6.3 Механізми самоорганізації нерівноважних систем

Найпопулярнішим і наочним прикладом утворення структур наростаючої складності є добре вивчене в гідродинаміці явище, яке називають осередками Бенара (1900 р.) (рис.27, 28). Для розуміння основних етапів самоорганізації систем у природі розглянемо це явище більш докладно.

При підігріванні рідини, що знаходиться в посудині між нижнім і верхнім її шарами виникає деяка різниця (градієнт) температур $\Delta T = T_1 - T_2$. Якщо градієнт малий ($\Delta T < \Delta T_c$), то перенесення тепла в рідині відбувається на мікроскопічному рівні (рис.27 а). Цей режим зберігається і при збільшенні ΔT системи (керуючого параметра) відповідно сама система прибуває у стадії еволюційного розвитку. Проте при досягненні градієнтом деякого критичного значення ($\Delta T > \Delta T_c$) в рідині раптово (стрибком) виникає конвекційний макроскопічний рух, в результаті створюються чітко виражені структури у вигляді циліндричних осередків (рис.27 б). Цей конвекційний рух виникає завдяки дії на об'єм рідини піднімальної сили, яка обумовлена різницею густини нагрітих і

холодних її шарів.

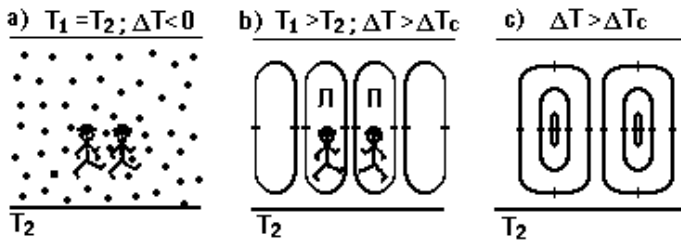


Рисунок 27 – Стан рідини: а – в рівноважному стані при $\Delta T < \Delta T_c$; б – утворення вихорів Бенара при $\Delta T > \Delta T_c$, літерами Л і П позначені напрямки обертання вихорів: Л – ліве, П – праве, відповідно; в – структура двох сусідніх вихорів Бенара

Явище раптового виникнення упорядкованості у русі рідини, як уже відмічалось, називається біфуркацією. Відповідна біфуркаційна діаграма ефекту Бенара зображена на рис. 28 а. Зверху така макрорядкованість виглядає як стійка комірчаста структура, схожа на бджолині соти (рис.28 б). У центрі комірок теплові конвекційні потоки направлені вгору, а на гранях комірок під дією сили тяжіння відбувається рух молекул вниз.

Процес виникнення упорядкованості в системі можна зобразити кількісно у вигляді залежності потоку теплоти q , що переноситься, від різниці температур ΔT між нижнім і верхнім шарами рідини. При $\Delta T > \Delta T_c$ коли в системі починається структуроутворення, відбувається різкий злам цієї залежності. В результаті виникнення конвекційних комірок тепло починає більш інтенсивно переноситися через рідину (рис.29), відповідно за цих умов рідина починає більш інтенсивно експортувати ентропію.

До точки біфуркації відтік ентропії в системі ($\Delta_e S$) компенсувався її виробленням ($\Delta_i S$) за рахунок внутрішнього тертя і теплопровідності. Після точки біфуркації ΔT_c відтік ентропії починає суттєво перевершувати її вироблення, як результат у системі виникають нові структури: у сукупності частинок виникають нові властивості, яких немає у її елементів. Цю властивість називають *кооперативністю* або *когерентністю*.

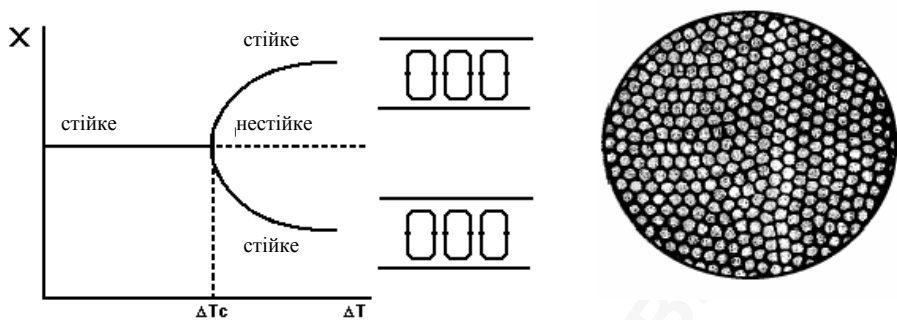


Рисунок 28 – Біфуркаційна діаграма ефекту Бенара. X – деяка величина, що характеризує напрямок обертання вихорів Бенара. При $\Delta T < \Delta T_c$ існує один стійкий, рівноважний стан рідини. При $\Delta T > \Delta T_c$ рівноважний стан стає нестійким, але з'являються два стійкі стани з різним напрямком обертання вихорів. Комірчаста структура рідини (б), що виникає у ефекті Бенара

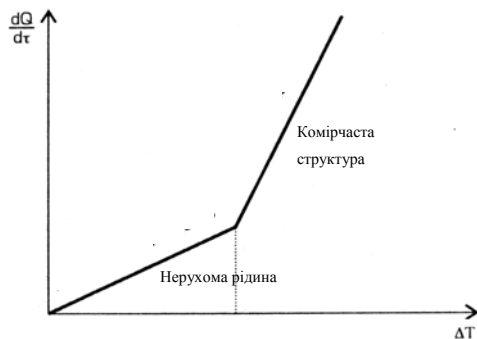


Рисунок 29 – Залежність теплового потоку q від різниці температур ΔT між нижніми та верхніми шарами рідини

Упорядкована поведінка молекул рідини припускає наявність далекодіючих кореляцій, тобто статистично відтворювальних співвідношень між віддаленими частинами системи. При цьому розміри впорядкованої структури, або довжина кореляції, дорівнюють приблизно 0,1 см (розмір осередку Бенара), тоді як

характерний масштаб міжмолекулярних взаємодій порядку 10^{-8} см. Інакше кажучи, осередок Бенара містить $\sim 10^{27}$ молекул!!!

Той факт, що така величезна кількість частинок може демонструвати когерентну поведінку, незалежно від випадкового теплового руху кожної з них, є однією з основних властивостей самоорганізації. Це явище неймовірно з позицій статистичної механіки. Адже у момент утворення осередків Бенара мільярди молекул рідини, як за командою, починають поводитися скоординовано, погоджено, хоча до цього перебували в хаотичному русі. Створюється враження, ніби кожна молекула “знає”, що роблять всі інші, і бажає рухатися єдиним загалом. Класичні статистичні закони тут явно не працюють, це явище іншого порядку. Адже якби, навіть випадково, така “кооперативна” структура утворилася б, що майже неймовірно, вона зразу і розпалася б. Проте вона не тільки не розпадається, а, навпаки, за відповідних умов (надходження енергії ззовні), стійко зберігається. Отже, *виникнення структур наростаючої складності - не випадковість, а закономірність.*

Іншою *відмінною особливістю вихорів Бенара є невизначеність у напрямку обертання конкретного вихору.* Як показують спостереження, сусідні вихори обертаються у протилежні боки. Одного разу вибраний напрямок обертання зберігається надалі. Проте, повторивши експеримент і досягнувши критичної різниці температур, можна в тому ж самому елементі об'єму рідини отримати зворотне обертання вихору.

Ніякі експериментальні хитрування не дозволяють отримати заданий наперед напрямок обертання заданого вихору - *цей процес має чисто вірогіднісний характер*, він визначається характером нескінченно слабких збурень системи в даному елементі об'єму рідини. Таким чином, система з нестійкістю Бенара може бути прикладом того, як сильно нерівноважні системи стають “чутливими” до чинників, які поблизу стану рівноваги практично на неї не впливають. Як результат ми спостерігаємо дивну співпрацю визначеності (детермінізму) і випадковості (статистики).

Виникає питання: що відбудеться, якщо ми будемо продовжувати збільшувати різницю температур між нижнім і

верхнім шарами рідини за порогове значення ΔT_c ? У деякій області значень $\Delta T > \Delta T_c$ існуватимуть вихори Бенара, але деякі їх характеристики зміняться. Потім після переходу через інше критичне значення ΔT_{c_2} система одночасно перейде в нерегульований стан – *виникне хаос*. Але це вже не молекулярний хаос, який спостерігається при $\Delta T < \Delta T_{c_2}$, а *хаотичний об'ємний рух рідини*. Це режим, який передує явищу, яке в гідродинаміці називається *турбулентністю*. Він характеризується тим, що ламінарний режим руху рідини у осередках починає переходити у неупорядкований. У більш загальному випадку можна сказати, що *турбулентність – це лише один із аспектів загальної тенденції цілого класу систем до переходу в хаотичний режим за певних умов*. Процес народження турбулентності при обтіканні циліндра потоком рідини зображений на рис. 30.

Отже, простежуємо, що неравноважність дозволила системі уникнути теплового хаосу і трансформувати частину енергії, що надходить із зовнішнього середовища, у впорядковану поведінку нового типу – так звану *дисипативну структуру*. Вона характеризується порушенням симетрії, множинними виборами можливих станів і кореляціями в макроскопічних масштабах. Структури, що виникають в процесі самоорганізації, назвали *дисипативними*, оскільки для їх підтримки потрібно більше енергії, ніж для підтримки більш простих систем. Подібні структури мають стійкість, необхідну для їх тривалого існування. *Утворення цих структур відбувається не через зовнішню дію, а за рахунок внутрішньої перебудови системи, коли система самонастроюється або самоорганізується на зовнішні чинники, досягаючи рівноваги з умовами зовнішнього середовища*.

Процеси самоорганізації, як уже зазначалося, математично описуються абсолютно інакше, ніж рівноважні процеси, вони описуються нелінійними диференціальними рівняннями. *Процес самоорганізації, як і динамічний хаос, пов'язаний з динамікою системи, а не з конкретною природою досліджуваного об'єкта*. Тому він має *універсальний характер* і виявляється у фізиці, хімії, біології, економіці і т.ін. Організовуючим початком при формуванні впорядкованих структур є нестійкість і нелінійність. Але тут вони працюють по-іншому, ніж при встановленні динамічного хаосу.

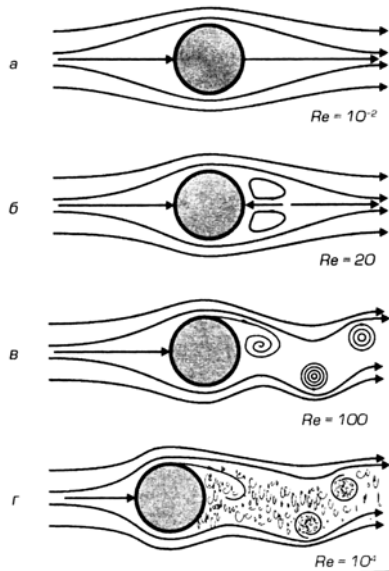


Рисунок 30 – Зміна характеру обтікання циліндру потоком рідини при збільшенні числа Рейнольдса. а – ламінарна течія; б – виникнення окремих вихрів; виникнення вихрової доріжки Бенара-Кармана; г – розвинута турбулентність

При утворенні упорядкованих структур важливу роль відіграють нелінійний відбір і синхронізація, або координація, суть яких полягає в такому. В нерівноважному середовищі за порогом нестійкості одночасно наростають найрізноманітніші рухи або збудження. На лінійній стадії процесу, коли амплітуди цих збуджень малі, панує повний хаос. На нелінійній стадії, коли їх амплітуди стають достатньо великими, починає працювати нелінійна конкуренція, оскільки всі збудження одержують енергію з одного джерела. Очевидно, що виживають лише ті з них, які краще пристосовані для цього, або, як кажуть, синхронізовані (скоординовані) з джерелом енергії і між собою. В результаті у системі виникають колективні форми руху, між якими існує конкуренція, яка і “проводить” відбір найстійкіших з них. Таким чином, комбінація взаємної конкуренції і синхронізації утворень різної орієнтації і масштабів приводить до виникнення дуже складних структур. Причому цей перехід відбувається абсолютно

спонтанно (випадково).

Зробимо підсумки розгляду різних систем у природі. Виявляється, що всі існуючі системи можна поділити на два принципово різних види: *ізолювані і відкриті*. Останні відрізняються тим, що можуть обмінюватися з навколишнім середовищем речовиною, енергією або інформацією. При цьому процеси в ізолюваних і відкритих системах можуть розвиватися за абсолютно різними законами. Процеси в замкнених системах, що ведуть до встановлення теплової рівноваги, супроводжуються зростанням неврегульованості. Вони йдуть в напрямку від порядку до хаосу.

У відкритих нерівноважних системах процеси можуть йти в напрямку від хаосу до порядку, в них порядок народжується з хаосу, тобто *хаос є не тільки руйнівний, але і творчий, конструктивний*. Ці системи численні і різноманітні: вихори в океані і атмосфері, хімічні реакції з часовою і просторовою періодичністю, лазери, живі організми і екосистеми; ринкова економіка, нарешті, в якій хаотичні дії мільйонів вільних індивідів приводять до утворення стійких і складних макроструктур. В таких системах спостерігається злагоджена поведінка, внаслідок чого зростає ступінь її впорядкування, тобто зменшується ентропія.

Лінійний характер еволюції складних систем, до якого звикла класична наука, не правило, а, швидше, виключення; розвиток більшості таких систем має нелінійний характер. А це означає, що для складних систем завжди існує декілька можливих шляхів еволюції. Розвиток здійснюється через випадковий вибір однієї з декількох дозволених можливостей подальшої еволюції в точці біфуркації. Отже, *випадковість - не прикре непорозуміння; вона вбудована в механізм еволюції*. А нинішній шлях еволюції системи, можливо, не кращий, ніж ті, які були знехтувані випадковим вибором.

7 СХЕМА ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИРОДІ

З урахуванням вищевикладеного універсальна схема будь-якого еволюційного процесу виглядає так, як зображено на рис. 31.

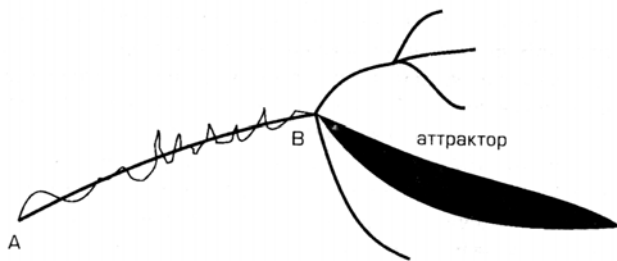


Рисунок 31 – Еволюція системи у стійкому та нестійкому станах

На початковому етапі розвитку (відрізок AB) відбувається повільна зміна властивостей системи. При цьому ситуація може бути передбаченою з точністю до випадкових флуктуації - шумів, що не змінюють загального характеру розвитку. В деякий момент часу B (точка біфуркації) або зовнішній вплив на систему досягає критичного значення або відбувається накопичення і об'єднання внутрішніх дій системи. В цей момент її параметри починають швидко змінюватися; раніше стабільний стан втрачає стійкість і виникає можливість різних шляхів розвитку BC , BD , $BE...$ Нестійкість системи означає, що флуктуації перестають бути просто «шумом» і перетворюються на чинник, що направляє глобальну еволюцію системи. Цими флуктуаціями цілком можна було знехтувати, поки система була стійкою, але вони стають вирішальними для нестійкої системи. Система стає надчутливою до малих впливів.

Серед різних гілок еволюції після точки біфуркації B є траєкторія (або достатньо вузький коридор траєкторій), яка відрізняється порівняно довгою стійкістю. Вона немов би притягає до себе всю безліч траєкторій систем з різними початковими станами тобто є аттрактором. Якщо система потрапляє в цей коридор (конус) траєкторій, то вона неминуче еволюціонує до цього відносно стійкого стану. Математичний опис процесів в таких системах вимагає використання нелінійних рівнянь, які мають розв'язки, характер яких визначається параметром рівняння. Через

імовірнісний характер біфуркаційних процесів еволюція не може мати зворотного ходу. Це призводить до необоротності не тільки еволюції, але і часу, виникнення “стріли часу”.

Таким чином, стає зрозуміло, що випадковість – це творчі, конструктивні засади природи, які здатні вивести систему на атрактор, на одну з нових власних структур середовища, яке відповідає її внутрішнім тенденціям.

І. Пригожин і Н. Н. Моїсєєв сформулювали загальний принцип еволюції всіх відкритих систем у природі: ***якщо закони збереження (матерії, енергії, імпульсу) допускають декілька рівноважних станів (розв’язків), то завжди реалізується стан руху, якому відповідає мінімальне зростання ентропії.***

Розглянемо більш докладно загальну схему еволюційних процесів, яка є справедливою для всіх трьох рівнів організації матеріального світу - неживої (косної) матерії, живої речовини і суспільства. Їх особливістю є те, що всі ці процеси через природні закони розвитку направлені у бік ускладнення організації систем і зростання різноманітності їх форм (морфогенезу). Для опису процесу самоорганізації зручно скористуватися мовою теорії відбору Дарвіна, або, як кажуть, дарвінівською тріадою, в якій дещо змінено зміст термінів: *мінливість, спадковість, відбір.*

Нові якісні особливості системи з’являються завдяки *мінливості*. Остання спричиняється стохастичністю, випадковими змінами в системі, виникненням флуктуації. Далі починають працювати принципи *відбору*, що дозволяють вибрати з можливих віртуальних станів деяку безліч допустимих. До кількості правил відбору, перш за все, належать закони збереження, закон зростання ентропії в ізолюваній системі та інші. Інакше кажучи, *закони відбору - це закони фізики, хімії, біології, закони суспільного розвитку, які з віртуальних рухів відбирають ті, що ми спостерігаємо.* Принципи відбору допускають існування біфуркацій, тобто можливий перехід об’єкта в безліч нових станів. Це призводить до принципової непередбачуваності його еволюції.

У Всесвіті панує *спадковість*: стан системи сьогодні і її майбутнє залежать від минулого. Цю залежність можна умовно назвати *спадковістю* системи, вона пов’язана з її *пам’яттю*. В природі, як правило, реалізуються проміжні ситуації, але можна навести приклади крайніх станів, тобто випадки нескінченної і нульової

пам'яті. *В детермінованих системах пам'ять нескінченна*: тут сьогодні повністю визначає майбутнє, а минуле – сьогодення. Наприклад, рух тіла під дією сили - система з нескінченною пам'яттю. *Мала пам'ять є характерною для турбулентних потоків і вихорів* - за заданим розподілом вихорів в турбулентному потоці не можна нарисувати картину попереднього стану. Для цих випадків пам'ять наближається до нуля. Приклад системи з обмеженою пам'яттю - погода. Вона «пам'ятає» свій попередній стан не більше двох-трьох тижнів.

8 НОВІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ. ПАМ'ЯТЬ СИСТЕМИ

Керуванням називають процедуру вибору і реалізації визначених цілеспрямованих дій. Як правило, технічних системах мета не належить системі, вона є зовнішнім по відношенню до неї фактором. Інша річ складні відкриті системи до яких, наприклад, належить суспільство, чи будь-яка інша природна система. Як правило, у таких системах існує сукупність цілей, при цьому вони не задаються ззовні, а генеруються самою системою.

У реальних природних системах резонансна, нехай навіть слаба, дія завжди приводить до більшого ефекту, ніж сильна, але не узгоджена з системою. Традиційний («лінійний») погляд на проблему керування процесами зводився до уявлень, що чим більше вкладеш (енергії, матеріальних засобів, нервів і так далі), тим більшу віддачу одержиш. Синергетика дає нам *новий підхід до проблеми керування*: надмірна централізація може призвести до непередбачуваних наслідків, до кризи, оскільки існує багато шляхів розвитку системи, і вона прагне вийти на один із своїх атракторів. *Якщо є алгоритм виходу на атрактор, зберігаються час, ресурси, зусилля і інше*. В резонансній дії важлива не величина, не сила впливу в процесі керування, а його правильна просторова організація, «архітектура». Тобто треба діяти на середовище в потрібних місці і часі, топологічно узгоджених з її власною структурою.

Ненасильство над природою речей - ось принципи синергетики. Треба не будувати і перебудовувати, а виводити, ініціювати складні системи на власні механізми розвитку.

Наприклад, суспільний прогрес стимулюється, харчується свавіллям і егоїзмом індивідуумів, користю, хаотичністю, неповторністю, особовою забарвленістю їх інтересів. Якщо всі члени суспільства стануть раптом добродійними, то воно прийде до упадку і запустіння. Саме різноспрямованість, хаотичність поведінки індивідуумів, пов'язана з їх рухливістю, приводить до прогресу. Цей же шлях у нікуди жде й будь-яку закриту систему, наприклад "закрите суспільство".

У таких складних системах доречно перейти від терміну керування до терміну вибору напрямку розвитку. Зовнішні дії при цьому повинні бути направлені не на жорстоке керування з точно визначеними цілями, а на підтримку бажаних тенденцій розвитку або відхід системи від катастрофи. Мова йде про спрямування природних процесів самоорганізації у бажане русло розвитку, яке приведе до порівняно довгого проміжку стабільності системи. Таким чином, повинен реалізовуватися принцип кормчого: кормчий не направляє корабель наперекір стихії, а використовує сили природи для того щоб рухатися вибраним курсом.

Отже, хаос – необхідна умова для виходу системи на атрактор, на власну стійку тенденцію до розвитку. Наведемо слова І. Пригожина із цього приводу: «все, чим відрізняється цей світ від сірого, однорідного хаосу, виникло і існує внаслідок відтоку ентропії в навколишнє середовище. Негативною ентропією харчується все живе і все створене життям, а отже, наука і мистецтво. Людина творить негативну ентропію, створюючи нову, незамінну інформацію». Важливим наслідком емпіричних узагальнень є твердження, що *стохастичність і бифуркації приводять у процесі еволюції до безперервного збільшення різноманіття форм світу – морфогенезу.* Природа дає можливість з'явитися новим формам організації матерії, ці форми як би потенційно нею заготовлені, але деталі процесу непередбачувані.

Наприкінці наведемо три ключові слова, які достатньо повно визначають значення суті синергетики: *відкритість, когерентність, нелінійність.* Перш за все, синергетичні властивості можуть виявлятися у відкритих системах, які обмінюються з навколишнім середовищем матерією, енергією і інформацією. Далі, такі системи виявляють властивість

когерентності, коли окремі її елементи діють синхронно, погоджено один з одним. І, нарешті, опис подібних систем здійснюється за допомогою нелінійного математичного апарату.

9 УНІВЕРСАЛЬНИЙ (ГЛОБАЛЬНИЙ) ЕВОЛЮЦІОНІЗМ

Однією з центральних ідей сучасної науки є ідея розвитку, або ідея еволюції. Сьогодні природознавство і, перш за все, фізика знайшли теоретичні і методологічні засоби для створення єдиної моделі еволюції, виявлення загальних законів природи, що зв'язують в єдине ціле походження Всесвіту, виникнення життя, людини і суспільства. Така концепція отримала назву *універсального або глобального еволюціонізму*. В цій моделі Всесвіт стає перед нами як природне ціле, що розвивається у просторі та часі, а вся його історія від народження до виникнення людства розглядається як єдиний процес, в якому космічний, хімічний, біологічний і соціальний типи еволюції зв'язані між собою. Це означає, що Всесвіт зазнає безперервних змін, і ми спостерігаємо його безперервну еволюцію. Все це відбувається завдяки процесам самоорганізації на всіх його рівнях ієрархії. До таких процесів належить і становлення Розуму, який теж виник в результаті еволюції Всесвіту. Отже, можна сказати, що все, що існує у світі, є результатом еволюції, яка має загальний всеосяжний характер.

Одним із найважливіших висновків концепції універсального еволюціонізму є думка *про спрямованість розвитку світу як цілого на підвищення своєї структурної організації*. Вся історія Всесвіту являє собою єдиний процес самоорганізації і розвитку матерії. В рамках даної концепції важливу роль відіграє антропний принцип. Він показує глибоку єдність закономірностей історичної еволюції Всесвіту і передумов виникнення і розвитку органічного світу, аж до людини включно. Згідно з цим принципом існує деякий тип універсальних системних зв'язків, які визначають цілісний характер існування і розвитку нашого світу як прояв нескінченного різноманіття матеріальної природи. Ідея універсального еволюціонізму, з одного боку, виступає в ролі якогось регулятивного принципу, що дає уявлення про світ як про єдину цілісність і дозволяє осмислити загальні закони буття в їх єдності, з іншого, – він орієнтує сучасне природознавство на пошук

конкретних закономірностей універсальної еволюції матерії на всіх її структурних рівнях і на всіх етапах самоорганізації. В основі універсального еволюціонізму лежать емпіричні узагальнення, вперше сформульовані Н. Моїсеєвим.

1 *Всесвіт є єдиною системою, що саморозвивається, тобто всі його елементи, так чи інакше зв'язані між собою.* Людина також є невід'ємною частиною цієї системи. Н. Моїсеєв називає це твердження *постулатом системності або гіпотезою про суперсистему.*

2 *Всі процеси у Всесвіті відбуваються під дією випадкових чинників при відомій мірі невизначеності, тобто випадковість і невизначеність у нашому світі на всіх структурних рівнях принципова.*

3 *У Всесвіті сьогодні і майбутнє залежать (але не визначаються) від минулого, тобто всюди володарює спадковість.* Це означає, що при аналізі багатьох явищ необхідно враховувати пам'ять про минуле, відповідні процеси називаються *немарковськими процесами.*

Практично у всіх існуючих сьогодні теоріях є єдина основа – на математичній мові всі вони описуються марковськими процесами – процесами без післядії (без пам'яті). Марковський (за ім'ям відомого російського математика А. Маркова, що сформулював це поняття), процес – це випадковий процес, для якого при відомому стані системи у даний момент часу її подальша еволюція не залежить від її стану у минулому, або, інакше кажучи, майбутнє і минуле у даний час не залежать одне від одного. Такі процеси широко використовуються при описі явищ світу, що нас оточує. В кінці ХХ в. виникло розуміння, що в біологічних, економічних і соціальних явищах *передісторією нехтувати не можна.* Тут роль пам'яті надзвичайно велика і вона може безпосередньо впливати на вибір шляху розвитку системи. Марковські процеси локальні в часі, тобто, знаючи стан системи в який-небудь момент часу t_0 , можна визначити імовірну поведінку системи в майбутньому, причому вона не змінюється при виникненні додаткової інформації про події при $t < t_0$. *Немарковські процеси враховують ці додаткові відомості (пам'ять про минуле) і тому за своєю природою є нелокальними в часі.* Можна сказати, що немарковська система (людина, суспільство) живе одночасно у

минулому, сьогодні і в майбутньому. Наприклад, область нелокальності для суспільства складає приблизно 40 років в минуле і 40 років в майбутнє, тобто термін активного життя покоління. Зовні цих меж – історичне минуле і непередбачуване майбутнє. Теорія немарковських процесів дозволяє, у принципі, створити математичні моделі ряду економічних і соціальних явищ; описувати різні ритми в біологічних, економічних і соціальних процесах.

4 У світі діють принципи відбору, які стверджують, що все що відбувається в природі не є абсолютним свавіллям. Інакше кажучи, *в природі реалізується не все, про що можна помислити*. Ці принципи обмежують втручання людини в природу, тому їх ще називають *принципами заборони*. У вузькому значенні під принципами відбору розуміють просто закони природи (наприклад, закони збереження), що виконують функції заборони.

5 Принципи відбору допускають існування біфуркаційних станів, тобто таких станів, з яких можливий перехід об'єкта в цілу безліч нових станів. У який з них перейде система, залежить від тих випадкових чинників, які діятимуть у момент переходу. Напрямок переходу не може бути передбачений принципово.

Наведені емпіричні узагальнення справедливі для процесів, що відбуваються в неживій природі, також і в живій речовині, і в суспільстві. Тому вони можуть скласти основу деякої універсальної мови, придатної для опису будь-яких процесів, що протікають у Всесвіті на всіх рівнях організації матерії. Вони також дозволяють зробити деякі висновки фундаментального характеру, що є їх наслідком.

Розглянемо деякі наслідки з наведених постулатів. Гіпотеза суперсистеми відкидає припущення про існування будь-яких паралельних або ортогональних світів, які не сприймаються безпосередньо нашими засобами пізнання і не взаємодіють з нашим Всесвітом.

З факту, що світ є стохастичним і в ньому діють механізми біфуркаційного типу, можна зробити висновок про безповоротність еволюції. Доведено, що імовірність повторення в еволюційному розвитку Всесвіту якогось із його минулих станів дорівнює нулю. Цей висновок має сенс строгої теореми. Одночасно він еквівалентний твердженню про безповоротність часу.

Ще один із важливих наслідків: випадковість і біфуркації приводять в процесі еволюції до безперервного зростання різноманітності і складності організаційних форм матеріального світу – морфогінез. З цього випливає, що: процес самоорганізації Всесвіту має направлений характер – йде безперервне зростання різноманітності і ускладнення як усього Всесвіту, так і окремих його частин. Все це є наслідком закладених в ньому можливостей, але деталі самого процесу є непередбачуваними. При загальній спрямованості процесу розвитку, яка характеризується зростанням різноманітності можна говорити лише про тенденції, про очікувані зміни організаційних структур. У процесі еволюції безперервно відбувається руйнування існуючих структур, що дають матеріал для виникнення нових. Тому значення еволюції полягає не стільки у вдосконаленні окремих організаційних структур, їх пристосуванні до зовнішніх умов, що змінюються, скільки в заміщенні менш стабільних більш стабільними в даній конкретній ситуації.

Особливу роль в схемі універсального еволюціонізму відіграє явище суперсистеми, об'єднання простих систем в більш складні з новою структурою зв'язків. У результаті в системі виникають нові властивості, відсутні у підсистем. Кооперативність спостерігається вже на рівні неживої природи (наприклад, когерентність випромінювання, резонанси та ін.). У живому світі ми бачимо неймовірну різноманітність різних форм кооперативного руху. В розвитку живої речовини це явище стає визначальним, разом з внутрішньовидовою боротьбою та іншими чинниками, які складають зміст еволюції живого світу. Навіть найпростіші багатоклітинні істоти є результатом дії кооперативних механізмів, що приводять до нової цілісності. В суспільстві кооперативність займає ще більш важливе місце, будучи одним з основних чинників, що визначає людські відносини.

У міру розвитку цивілізації кооперативність відіграватиме все більшу роль у визначенні долі людства. Спрямованість світового еволюційного процесу розвитку є наслідком тих емпіричних узагальнень, які визначають основні особливості самоорганізації. *При цьому у міру зростання складності систем відбувається прискорення процесів їх розвитку і зменшення ступеня стабільності.* Звернемо увагу на те, що стабільність і швидкість

еволюції в певному значенні суперечать одна одній.

Тенденція зменшення стабільності при ускладненні матеріальних структур має пряме відношення до історії розвитку цивілізації. Виникла гіпотеза про те, що в процесі природної еволюції *Всесвіт реалізує за допомогою людини здатність не тільки пізнавати самого себе, але і направляти свій розвиток так, щоб компенсувати або ослабити чинники дестабілізації*. В результаті у людства з'являється певний шанс зберегти себе в біосфері і Всесвіті.

Синергетика в широкому значенні може бути названа "еволюційним природознавством". Від Буття до Становлення – ось, наслідуючи Іллю Пригожина, орієнтація нової наукової парадигми, в контексті якої акцент переноситься з вивчення інваріантів системи, положень рівноваги на вивчення станів нестійкості, механізмів виникнення нового, народження і перебудови структур.

10 ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПІВ СИНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ПОЯСНЕННЯ ПРИРОДНИХ ЯВИЩ

Згідно з новою концепцією, будь-який еволюційний процес у Всесвіті може бути описаний як черода змін опозиційних якостей – умовних станів порядку і хаосу в системі, які сполучені фазами переходу до хаосу (загибель структури) і виходу з хаосу (самоорганізації). З цих чотирьох стадій лише одну стабільну можна зарахувати до Буття (термінологія Пригожина), гомеостазу системи, часто саме вона найпротяжніша у часі, інші три так чи інакше пов'язані з хаосом і належать до Становлення або кризи. Умовність такого розбиття пов'язана з тим, що у всякому порядку є частка хаосу, і навпаки, в хаосі можна знайти елементи порядку, все визначається мірою їх змішування. Відносну короточасність глибоких криз можна пояснити заходами еволюційної безпеки природи, тривала криза різко виснажує адаптаційні можливості системи і вона гине, зникає її системна цілісність. Тому у природі процес еволюції відбувається дрібними кроками. Універсальні методи опису цих стадій як вже відмічалось розвинені в синергетиці.

У найпростішому варіанті можна говорити про 7 основних принципів синергетики: два принципи Буття, і п'ять – Становлення.

Два принципи Буття:

1 – гомеостатичність;

2 – ієрархічність.

Вони характеризують фазу "порядку", стабільного функціонування системи, наявність стійких дисипативних структур – атракторів, на яких функціонує система.

1 Гомеостатичність. Гомеостаз це підтримка програми функціонування системи, її внутрішніх характеристик в деяких рамках, що дозволяють їй слідувати до своєї мети. Згідно з ідеями батька кібернетики Н.Вінером будь-яка система телеологічна, тобто має мету існування. При цьому від мети – еталона система одержує коректувальні сигнали, що дозволяють їй не збитися з курсу. Це коректування здійснюється за рахунок негативних зворотних зв'язків (частка сигналу з виходу системи подається на вхід із зворотним знаком). У результаті пригнічуються будь-які відхилення в програмі поведінки, що виникають під дією зовнішніх впливів середовища. Таким чином поведінка будь-якої машини або організму, що характеризуються саморегуляцією через зворотній зв'язок, може бути названою "цілеспрямованою", оскільки вона переслідує деяку мету. Саме так велику частину часу ведуть себе всі живі та багато інших систем, наприклад, теплокровні тварини підтримують температуру тіла постійною в широкому діапазоні зовнішніх температур; автопілот літака, звіряючись з гірокомпасом, витримує курс і висоту літака (рис.32) і т. ін.

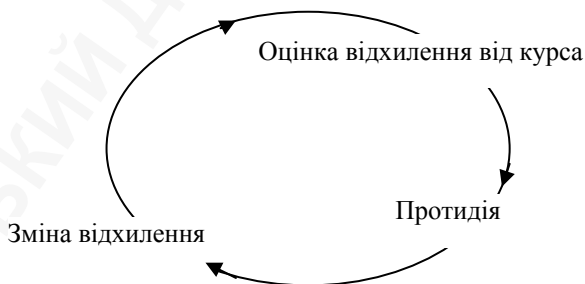


Рисунок 32 – Петля зворотного зв'язку, що дозволяє управляти літаком

Зворотній зв'язок є суттєвим механізмом гомеостазу - саморегулювання, яке дозволяє живим організмам підтримувати

себе у стані динамічної рівноваги з навколишнім середовищем. Саме мета-програма поведінки системи в стані гомеостазу є атрактором.

2 Ієрархічність. Наш світ, як встановлено вченими, є ієрархічним, наприклад, у масштабах довжин, часу, енергій. Це означає, наприклад, що базові структури Всесвіту беруть не всі можливі значення енергій, але з відносним кроком приблизно в 100 разів, починаючи від кварків і закінчуючи живими організмами (*сходинки Вайсскопфа*). Сама ж кількість рівнів неозоро велика, в кожній базовій структурі існує безліч підрівнів.

Основною особливістю структурної ієрархії є складова природа вищих рівнів у відношенні до нижчих. Те, що для більш низького рівня є структура – Космос, для вищого є будівельний матеріал, безструктурний елемент Хаосу. Тобто Космос попередньої структури є Хаосом для подальшої. В результаті ми спостерігаємо той складний світ, що нас оточує: нуклони утворені кварками, ядра – нуклонами, атоми – ядрами і електронами, молекули – атомами, суспільство – людьми і т. ін. Подібна ієрархія спостерігається також, наприклад у мові (слова, фрази, тексти) і в світі ідей (думки, погляди, ідеології, парадигми), в рівнях керування і т. ін.

Будь-які елементи, що утворюють структуру, передають їй частину своїх функцій, ступенів вільності, які тепер висловлюються від імені колективу всієї системи, причому на рівні елементів цих понять могло і не бути. Наприклад, громадську думку "висловлює" міфічний середньостатистичний суб'єкт, і цілком може виявитися, що саме так взагалі ніхто не думає. Ці колективні змінні існують на більш високому ієрархічному рівні, ніж елементи системи. У синергетиці їх прийнято називати *параметрами порядку* - саме вони описують в стислій формі значення поведінки і мету - атрактор системи. Природа параметрів порядку, що описана, називається *принципом підкорення*. Справа у тому, що зміна параметра порядку немов би синхронно диригує поведінкою безлічі елементів нижчого рівня, що створюють систему. Така в ідеалі роль законодавства в суспільстві, що делегувало державі частину свобод своїх громадян; так у вируючому потоці води кружляє водверть, що захоплює частинки в зладженому танці.

Важливою властивістю ієрархічних систем є неможливість

повної *редукції*, зведення властивостей структур складніших ієрархічних рівнів до мови більш простих рівнів системи. Кожний рівень має внутрішню межу складності опису, перевищити яку не вдається на мові даного рівня. Саме тому абсурдною є спроба вульгарного редукціонізму, тобто зведення всіх феноменів життя і психіки до законів фізики елементарних частинок, лише на тій підставі, що з них побудована вся матерія.

Виділену роль в ієрархії систем грає час, і синергетичний принцип підкорення Хакена формується саме для часової ієрархії. Подамо нашу реальність нескінченною чередою структурних часових рівнів-масштабів: від надшвидких процесів у мікросвіті до масштабів часу життя Всесвіту.

Розглянемо тепер три довільних найближчих послідовних часових рівнів (рис.33). Назвемо їх мікро- макро- і мегарівнями відповідно. Прийнято говорити, що параметри це довгоіснуючі колективні змінні, які задають мову середнього макрорівня. Самі вони утворені і керують швидкими, короткоіснуючими змінними, що задають мову нижнього мікрорівня. Останні асоціюються для макрорівня з безструктурним тепловим хаотичним рухом, що неможливо виразити на його мові в деталях. Наступний, розміщений над макрорівнем, мегарівень, утворений надповільними "вічними змінними", які виконують для макрорівня роль параметрів порядку, або як тепер їх прийнято називати керуючими параметрами.

Отже, на кожному рівні системи співіснують уявлення і категорії хаосу та вічності як атрибути присутності та впливу сусідніх мікро- і мегарівнів ієрархічного устрою Всесвіту.

У точці біфуркації макрорівень зникає і виникає прямиий контакт мікро- і мегарівнів, що народжують макрорівень з іншими якостями. Точка біфуркації - мить на макро- і мегарівні є протяжною в часі областю кризи на мікрорівнях.

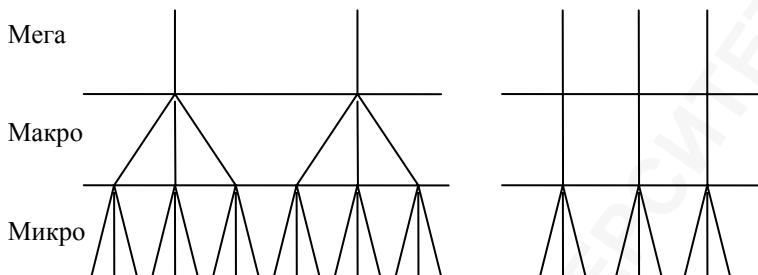


Рисунок 33 – Часова ієрархія масштабів рівнів, що коеволюціонують

При розгляді двох сусідніх рівнів принцип підкорення свідчить: *довгоіснуючі змінні керують короткоіснуючими*, вищерозміщений рівень – тим, що лежить нижче (див. рис.33). Так, мікроскопічні хаотичні рухи молекул складаються у відчутний порив вітру, який відносить їх на величезні в порівнянні з мікропереміщеннями відстані. Міграційні потоки визначають розподіл особин популяції або народонаселення, а культурна традиція відтворюється в безлічі сімей протягом поколінь.

Необхідно підкреслити, що принцип підкорення справедливий не завжди, його не варто абсолютизувати. Не завжди вдається назвати спосіб виникнення параметра порядку, або керуючого параметра із змінних низького рівня. Часто це формування виникло дуже давно і зовсім не з тих змінних, які існують зараз. У результаті ми спостерігаємо лише успадковану або уявну ієрархічність. Наприклад, більшість процесів на Землі тим або іншим чином пов'язані з добовими, річними або місячними циклами; тобто ці періоди є керуючими – параметрами для планети, її біосфери, хоча самі земні події ніяк не впливають на них. Щоб зрозуміти це, необхідно розглянути процес виникнення Сонячної системи з газопилової хмари, оскільки саме тоді відбувся процес народження параметрів порядку. В процесі формування Сонячної системи матерія відокремилася в планетах і далі активна дисипація-еволюція йшла саме на них і на Сонці, а космічні ритми стали консервативним залишком ранньої епохи утворення системи. У

цьому випадку не всякий повільний параметр буде "головнішим" від будь-якого швидкого, і ми одержуємо коеволюцію квазізалежних ієрархічних систем: наш пульс і дихання слабо залежать від пори року; кланові узи завжди слабшають із зростанням кількості поколінь; колись єдиний Всесвіт предстає перед нами розрізненими острівцями зоряної матерії; вимерлі архаїчні організми дали фантастичну різноманітність життю та ін. Все це свідочить про те, що ієрархічність не може бути раз і на завжди встановлена, тобто не охоплюється тільки принципом Буття, порядку. Необхідні принципи Становлення - провідники еволюції.

До п'яти принципів Становлення належать: 3 – нелінійність; 4 – нестійкість; 5 – незамкнутість; 6 – динамічна ієрархічність; 7 – можливість спостереження.

Ці принципи характеризують фазу трансформації, оновлення системи, проходження нею послідовно шляхом загибелі старого порядку, хаосу випробувань альтернатив і, нарешті, народження нового порядку.

Почнемо з перших трьох принципів.

3 Нелінійність. Лінійність – один з ідеалів простоти і бажання багатьох поколінь математиків і фізиків, що намагалися звести реальні задачі до лінійної поведінки. Важливо, що це завжди вдається поблизу положення рівноваги системи. Образи такої поведінки: коливання математичного маятника з малою амплітудою або тягарця на пружині, а також рівномірний або рівноприскорений рух тіл, відомі з шкільного курсу фізики. Однак і вища школа вчить розв'язувати в основному лінійні задачі (лінійні диференціальні рівняння), розвиваючи у людей лінійну інтуїцію, створюючи ілюзію простоти цього світу. Гомеостаз системи часто здійснюється саме на рівні лінійних коливань біля оптимальних параметрів, тому таким важливим є простий лінійний випадок. Він економить інтелектуальні зусилля людини. Визначальною властивістю лінійних систем є принцип суперпозиції: в результаті сума розв'язків теж є розв'язком, результат сумарної дії на систему є сумою результатів, так званий лінійний відгук системи, прямо пропорційний дії.

Але світ, що складається з лінійних систем, був би дуже простий та нудний. У ньому не могли б відбуватися хімічні реакції, оскільки атоми не можуть втратити жодного електрона; в ньому

повинна царювати стабільність та визначеність, і, взагалі, в такому світі неможливо створити нічого нового, нічого синтезувати або розділити. Це світ нескінченної кількості пружних першоцеглин, що стикаються, виникнення яких є нез'ясованим.

Нелінійність – це порушення принципу суперпозиції в деякому явищі, як результат сума дій перестає дорівнювати сумі їх результатів. У більш якісному значенні: результат непропорційний зусиллям, неадекватний їм, гра не коштує свічок; ціле не є сумою його частин; якість суми не тотожна якості доданків, і т.ін. Останнє, зокрема, впливає з того факту, що в системі кількість зв'язків між її елементами росте швидше за число самих елементів.

Як правило, прогнози майбутнього складають, лінійно екстраполюючи, свідомо чи несвідомо, в майбутнє те, що відбувається зараз або було в найближчому минулому. Оскільки історія, безумовно, – нелінійний процес, ці прогнози не мають нічого спільного з реальністю. Але це не означає, що треба відмовитися від простого лінійного прогнозування, цього основного стандарту нашого мислення, просто треба визначити і обмежити область його застосування.

Будь-яка межа цілісності об'єкта, його руйнування, розділення, поглинання, допускає нелінійні ефекти. Можна сказати, що нелінійність найчастіше виявляє себе поблизу меж існування системи. В загальному випадку, щоб перейти від одного стану гомеостазу до іншого, система вимушена потрапити в область сильної нелінійності. При цьому бар'єр, що треба здолати, тим вищий, чим сильніше притягання до атрактора і більша область гомеостазу. Тому, наприклад, простіше відразу вчити плавати правильно, ніж потім перенавчати. Радикальна перебудова системи, що розміщена поблизу глибокого гомеостазу завжди вимагає великих зусиль.

Органи чуття так само мають нелінійні характеристики чутливості, межі сприйняття, інакше люди були б казковими істотами, яким доступні всі частоти і інтенсивності вібрацій і випромінювань, з таким надмірним об'ємом інформації, ніякий мозок упоратися не зміг би. Крім того, шкала чутливості є не лінійною, а логарифмічною функцією. Тому при збільшенні інтенсивності звуку в 100 разів він здається голоснішим лише у два рази. Це дозволяє чути і шерех листа, і удар грому, хоча їх

інтенсивності відрізняються в мільйони разів.

У кризових ситуаціях, традиційних для нашого часу, розв'язати їх можуть допомогти лише нелінійні методи, нелінійне мислення.

4 Незамкненість (відкритість). Ця властивість довгий час лякала дослідників, оскільки розмивала поняття системи, що обіцяло неконтрольовані проблеми. Тому, хоча в природі всі системи в тією чи іншою мірою є відкритими, історично першою класичною ідеалізацією була модель замкнутої, ізольованої системи: системи, яка не взаємодіє з іншими тілами.

Важливо зрозуміти, що будь-яку систему можна із заданою точністю вважати замкнутою лише достатньо малий час, який є тим менший, чим більш відкритою є система. Якщо цей час істотно менший за час спостереження за системою, то така модель виправдана. Наприклад, наша Земля це, з хорошою точністю, ізольований, вільний шар, що обертається навколо власної осі і мчить навколо Сонця. Одночасно неврахована нами взаємодія з супутником Землі – Місяцем – приводить до дуже слабкого додаткового ефекту уповільнення швидкості обертання нашої планети, а взаємодія з Сонцем – до повільного повороту осі обертання (прецесії) з періодом, що складає близько 25 тисяч років – так званий рік Платона. За час життя одного покоління ці ефекти абсолютно непомітні.

Для замкнених систем справедливими є фундаментальні закони збереження (енергії, імпульсу, моменту імпульсу), але найголовніше – другий закон термодинаміки. Саме тому хаос в замкненій системі може лише зростати, порядок приречений зникнути. Отже, замкнена система не може збільшувати свій порядок, в результаті, як стверджує класична термодинаміка, замкнутий Всесвіт йде до хаосу – теплової смерті.

У той самий час саме існування життя, високоорганізованого розуму, що упорядковує цей світ, повстає проти такої перспективи. Але цей порядок і живі організми, і людська цивілізація створюють у собі і навколишньому середовищі лише за рахунок збільшення загального безладдя, ентропії. Самі ж живі системи і суспільство – системи відкриті, вони обмінюються речовиною і енергією з навколишнім середовищем, в результаті їх ентропія може зменшуватися.

Саме відкритість дозволяє еволюціонувати таким системам від

простого до складного. Це означає, що будь-який ієрархічний рівень може розвиватися, ускладнюватися, тільки при обміні речовиною, енергією, інформацією з іншими рівнями.

У неживій природі дисипація енергії теж може приводити до виникнення впорядкованих структур. Приклад, – еволюція Сонячної системи та і всього Всесвіту в цілому.

Виявляється, що при переході від одного положення гомеостазу до іншого, в області сильної нелінійності, в точках нестійкості система обов'язково стає відкритою. Відповідно, якщо спочатку для опису системи використовувалася замкнена модель, в таких точках її слід розширити до відкритої. Але для цього ми повинні ознайомитися з таким принципом.

5 Нестійкість. Нестійкість будь-якої системи довгий час вважалася її недоліком. Ну хто конструюватиме нестійкий автомобіль або літак? Так було до недавнього часу, поки не знадобилися механізми нового покоління, що швидко переходять з однієї програми-гомеостазу – до іншої; системи, що можуть сприйняти різні моделі поведінки, вміють навчатися та ін.

Найбільш відомим прикладом нестійкості можна вважати перевернений маятник, що готовий впасти вправо або вліво від точки рівноваги залежно від найменшої дії ззовні, раніше абсолютно неістотної. Таким чином, у точці нестійкості система (навіть замкнута) стає дійсно відкритою. В результаті вона може бути використана як чутливий приймач дій інших рівнів буття, індикатором інформації, раніше недоступної для неї.

У станах нестійкості, при виборі нового стану, в точках біфуркації відбувається народження нової якості системи, вони характеризують рубіж між новим і старим. Наприклад, вища точка перевалу відділяє одну долину від іншої, результат випускного екзамену визначає майбутнє школяра, та й на життєвому шляху кожної людини дуже багато точок біфуркацій, точок вибору, усвідомлених і неусвідомлених.

Значущість точок біфуркацій полягає ще і в тому, що тільки в них можна несилowym, інформаційним способом, тобто скільки завгодно слабкими діями вплинути на вибір поведінки системи, на її долю. Але існують системи, в яких нестійкі точки майже повсюдні, наприклад в момент виникнення розвиненої турбулентності, і тоді настає хаос, вируючий потік.

6 Динамічна ієрархічність (емерджентність). Основний принцип проходження системою точок біфуркації - народження і загибель ієрархічних рівнів. Цей принцип описує виникнення нової якості системи по горизонталі, тобто на одному рівні, коли повільна зміна керуючих параметрів мегарівня призводить до біфуркації, нестійкості системи на макрорівні і перебудові його структури. Кожному знайомі перетворення води (пара-рідина-лід), що відбуваються при певних температурах фазових переходів, температурах біфуркацій.

У точці біфуркації колективні змінні, параметри порядку макрорівня повертають свої ступені свободи в хаос мікрорівня, розчиняючись в ньому. Потім у безпосередньому процесі взаємодії мега- і мікрорівнів народжуються нові параметри порядку оновленого макрорівня. В цьому випадку тріада Теос+Хаос = Космос подається як процес народження параметрів порядку: "керуючі надповільні параметри мегарівня" + короткоіснуючі змінні мікрорівня" = "параметри порядку, що створюють довгоіснуючі змінні макрорівня". Звідси можна зробити парадоксальний, на перший погляд, висновок (Ю.Л.Клімонтович), що виникнення турбулентності, вихорів в рідині, що тече, зовсім не є збільшенням безладдя, але народження колективних макрорухів, макроступенів вільності з хаотичних броунівських рухів мікрорівня рідини - народження порядку. Безладдя ж розглядається нами з позиції макрорівня, як збільшення його складності і непередбачуваності.

Мить між минулим і майбутнім - точка біфуркації, на мікрорівні є цілою епохою змін-трансформацій. Саме тут відбувається вибір, точніше, еволюційний відбір альтернатив розвитку макрорівня, якому ми надамо особливу увагу.

Наприклад, безладдя смутного часу, що зараз ми переживаємо повертає людям свободу вибору способів захисту життя і власності, способів прожитку і т.ін. Подібні обтяжливі ступені вільності і спонукають людину до найшвидшого подолання хаосу, кризи, суспільної біфуркації.

7 Спостережливість. Це принцип, який підкреслює обмеженість і відносність наших уявлень про систему в науковому експерименті. Зокрема, це принцип відносності щодо засобів спостереження, що яскраво виявив свої права в теорії відносності і

квантовій механіці. В теорії відносності довжина і час залежать від вибору системи відліку, у якій перебуває спостерігач, і те, що є одночасним для одного спостерігача, є неодноточасним для іншого. В квантовій механіці, вимірюючи точно одну величину, ми ніколи не можемо точно визначити іншу (принцип додатковості за Бором) та ін.

Спостерігається і відносність інтерпретації події залежно від масштабу спостережень. З одного боку, те, що було хаосом з позицій макрорівня, перетворюється на структуру при переході до масштабів мікрорівня, тобто самі поняття порядку і хаосу, Буття і Становлення відносні стосовно до масштабу спостереження. В результаті цілісний опис ієрархічної системи складається з комунікації між спостерігачами різних рівнів, подібно до того, як це відбувається в теорії відносності, де зіставляються результати, що одержують спостерігачі різних інерціальних систем відліку, або створюється загальна наукова картина світу з мозаїки дисциплінарних картин.

На завершення відзначимо обмеженість самої схеми розбиття реальності на Буття і Становлення у розглянутому вигляді. У останні десятиріччя активно вивчаються системи, в яких хаотична поведінка є нормою, а не короткочасною аномалією, пов'язаною з кризою системи. Це, перш за все, турбулентність, кліматичні моделі, плазма. Це означає перекриття різних ієрархічних рівнів на одному масштабі спостереження, наявність нестійкості, хаотичності на рівні Буття - так звані струнні атрактори, атрактори з хаотичною компонентою та ін, тобто слід розрізняти хаос Буття і хаос Становлення. Прикладом хаосу Буття є різноманітність форм життя біосфери, що гарантує її стійкість; наявність легкої хаотичності ритмів серця, що є ознакою хорошої адаптивності серцево-судинної системи, необхідний для стійкості елемент стихійності ринку і т. ін. Для таких систем цілком може бути застосований новий образ – Буття в Становленні.

Порівняння класичних і синергетичних систем у природі проведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння уявлень про “класичні” і “синергетичні” системи

Ознака	“Класична” система	“Синергетична” система
Поняття системи		
Принцип виділення	Аналітичний – за функціональною ознакою	Емпіричний – за належністю елементів до системи
Керування	Моноцентричне – керується з центра, неоднаково жорстко на різних рівнях ієрархії	Поліцентричне – відносно автономні системи, упорядковуються в динамічну мережу
Ієрархія	Задана	Генерується самою системою
Термодинамічний стан	Замкнуті, рівноважні (статична рівновага)	Відкриті, нерівноважні (динамічна рівновага)
Внутрішня структура елементів системи	Неістотна	Має певне значення для поведінки системи
Математичний опис	Лінійний, нелінійність трактується як перешкода моделюванню	Нелінійний, лінійний опис призводить до спрощення системи
Взаємодія із зовнішнім середовищем		
Вплив середовища	Середовище негативно впливає на систему	Середовище структурує систему
Параметри системи	Задані ззовні (зовнішнє нормування – термостат)	Генеруються самою системою (самонастроювання)
Поведінка системи у відношенні до середовища	При збуренні середовища прагне до повернення в рівноважний стан	Активно змінює середовище – в певних межах "маніпулює" середовищем
Граничні умови	Довільні – поведінка системи визначається її "програмою".	Характеризують саму систему, умови її самозбереження
Характер розвитку	Траскторія, оборотність	Процес, необоротність
Причинно-наслідкові відносини	Лінійні – причинно наслідкові ланцюжки	Циклічні (циркулярні) – вихідний сигнал може бути вхідним для тієї самої системи
Час	Абсолютний, єдиний, однорідний	Системний, відносний
Поняття порядку	Структура, що детермінується універсальними законами	Емерджентне самоутворення з флюктуацій у ході самоорганізації

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мандельброт Б. Фрактали в физике. –М.: Мир, 1988.
2. Хакен Г. Синергетика. –Москва: Мир, 1980.
3. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. –М., 1964.
4. Николис Р., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. –М.: Мир, 1979.
5. Пригожин И. От Существующего к Возникающему. Время и сложность в физических науках. –М.: Наука, 1985.
6. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. –М.: Прогресс, 1986.
7. Г.Николис, И.Пригожин. Познание сложного. –Москва: Мир, 1990.
8. Моисеев Н.Н. Современный рационализм. –М.: НГВП КОКС, 1995.