

## ПРОБЛЕМИ НАВЧАННЯ НЕРІВНОВАЖНИХ ПРОЦЕСІВ

Садовий М.І. (м. Кіровоград)

**Анотація:** стаття присвячена важливій проблемі дослідження розвитку нерівноважних, відкритих, неізольованих систем. Проаналізовано рівноважні процеси, чотири начала термодинаміки. Визначені межі їх застосування. Приведено порівняння рівноважних та нерівноважних систем, механізм утворення локальних лінійних нерівноважних систем та перспективи їх розвитку.

Ключові слова: нерівноважний, рівноважний, термодинаміка, відкрита система.

**Аннотация:** Статья посвящена важной проблеме исследования развития неравновесных, открытых, неизолированных систем. проанализировано равновесные процессы, четыре начала термодинамики. Определены границы их применения. Показано сравнение равновесных и неравновесных систем, механизм создания локальных линейных неравновесных систем и перспектив их развития.

Ключевые слова: неравновесный, равновесный, термодинамика, открытая система.

**Анотація:** стаття присвячена важливій проблемі дослідження розвитку нерівноважних, відкритих, неізольованих систем. Розкрито дві найважливіші події минулого століття: створення еволюційної теорії Дарвіна та феноменологічної термодинаміки.

Проаналізовано рівноважні процеси, чотири начала термодинаміки. Визначені межі їх застосування. Приведено порівняння рівноважних та нерівноважних систем, механізм утворення локальних лінійних нерівноважних систем та перспективи їх розвитку.

Для вивчення нерівноважних процесів як і у рівноважних системах окреслені умови складання рівняння балансу. але уже у відкритій системі для маси, енергії, імпульсу, ентропії складових елементів цієї системи. Такі рівняння розглядаються спільно з рівняннями, які описують функціонування системи. І.Р.Пригожин звернув увагу на порушення другого начала термодинаміки при розгляді таких систем і створив теорію термодинамічних нерівноважних процесів.

Ключові слова: нерівноважний, рівноважний, термодинаміка, відкрита система.

**Постановка проблеми.** Із великих наукових досягнень двох минулих століть своєю особливою специфічною направленістю виділяється еволюційна теорія Ч.Дарвіна і феноменологічна термодинаміка. Перша обґрунтувала розвиток живої матерії від нижчих форм до вищих, тобто ускладнення організації в процесі еволюції. За вдалим висловом друга передбачає дезорганізацію або руйнування наперед заданої структури в ізольованій системі під час її еволюції до стану рівноваги. Тобто еволюційна ідея ХІХ ст. виникла у вигляді двох протилежних форм - у вигляді теорії

«створення структури» Ч. Дарвіна і теорії «руйнування структур», якою є класична термодинаміка. Як наслідок виникла проблема: як доповнити класичну термодинаміку теорією «створення структури». Така проблема належить до числа фундаментальних у природничих науках, а пояснення виникнення структур є однією із найважливіших цілей наукового пізнання.

Упродовж кількох останніх десятиліть фізики, хіміки і біологи зуміли наблизитись до розуміння процесів формування структур у відкритих системах, тобто системах, які обмінюються речовиною й енергією з оточуючим середовищем. Відповідь на питання про причини і загальні закономірності самоорганізації міститься в термодинаміці незворотних процесів, або ж, як її прийнято називати, нерівноважній термодинаміці. Величезною заслугою нерівноважної термодинаміки є усвідомлення того факту, що нерівноважність може бути причиною порядку. Таким чином уперше вдалось перекинути місток і встановити зв'язок між протилежними властивостями. Виявилось, що незворотні процеси у відкритих системах можуть приводити до виникнення нового типу динамічних станів матерії – дисипативних (нерівноважних) систем, які самоорганізуються. При цьому джерелом нововведень у системі, тобто джерелом структурної еволюції, є флуктуації, які «каталізують» механізм нестійкості, що у свою чергу, приводить до формування нової просторо-часової структури.

**Аналіз останніх досліджень.** Минуло більше 150 років як виникли два напрямки розвитку термодинамічних систем: напрямок С.Карно (замкнуті системи) та напрямок Ж.Фур'є (відкриті системи). Перший із них успішно розвивався і знайшов своє відображення у роботах О.М.Матвєєва, В.Ф.Ноздрьова, В.Ф.Леонової, О.Д.Шебаліна, І.П.Базарова.

Другий напрямок набув розвитку починаючи із 40-х років минулого століття і дійшов апогею у 1979 р., коли І.Р.Пригожину було присуджено Нобелівську премію. Визначних успіхів у розробці теоретичних та

практичних питань досягли Л.С.Келдиш, І.Є.Тамм, А.К.Кікоїн, І.К.Кікоїн, М.О.Леонтович та ін.

У методиці навчання фізики рівноважні процеси вивчаються у шкільному курсі фізики у розділі молекулярна фізики та термодинаміка. вважається, що така методика розглянута досконало С.У.Гончаренком, О.І.Бугайовим, Є.О.Несмашним, С.М.Стадніченко, І.О.Морозом та ін.

Нерівноважні процеси практично у шкільному курсі фізики мало розкриті, а тому є потреба у розвитку методики навчання нерівноважних процесів у курсі фізики загальноосвітніх навчальних закладів.

**Виклад основного матеріалу.** Із усього розмаїття макроскопічних об'єктів, які використовуються у повсякденному житті поняття роботи у феноменологічній термодинаміці вивчає макроскопічні об'єкти, які знаходяться тільки в стані термодинамічної рівноваги. А для таких станів поняття часу не суттєве. Тому для опису стану термодинамічних систем поняття часу не використовується. Зокрема, такий стан описується рівнянням Клапейрона-Менделєєва, що об'єднує закони Бойля — Маріотта, Гей-Люссака і Шарля  $P\Delta V = \frac{m}{\nu} R\Delta T$ , де  $P$  – тиск газу,  $\Delta V$  – зміна об'єму даного газу,  $R$  – універсальна газова постійна,  $\Delta T$  – зміна температури. У статистичній фізиці дане рівняння має вигляд  $P\Delta V = Nk\Delta T$ , де  $k$  – постійна Больцмана,  $N$  – кількість частинок. В нього також не входить поняття часу.

У цьому сенсі про звичайну термодинаміку говорять як про термостатику. Термін «термодинаміка» введений у класичну фізику у 1854 році В. Томсоном. Він замінив на термодинаміку початкову назву цієї дисципліни «механічна теорія теплоти». В образній формі таке положення фізики формулюють у вигляді виразу «термодинаміка не знає часу [1].

Отже, часовий напрям у рівноважній термодинаміці не претендує на роль фундаментального поняття. Головною проблемою нерівноважної термодинаміки є розробка методів термодинамічного аналізу таких процесів.

У класичній механіці основними поняттями є координати і імпульс. Із законів класичної фізики Ньютона випливає детермінізм, за якого із відомих початкових умов можливо передбачити закономірності руху та зворотності часу: між передбаченням майбутнього та відновленням минулого немає жодної відмінності. Тоді можна було б стверджувати, що напрям часу - це «всього лише феноменологія».

Термодинаміка аналізує стан системи рівнянням Менделєєва-Клапейрона чи молекулярно кінетичної теорії газу. Основними її поняттями є робота та теплота. У термодинаміці поняття роботи  $A$  має свій початок у механіці газів  $\Delta A = F\Delta h = P\Delta V$ , а тому її фізичний стан визначений. Вона не є функцією стану і відповідно повним диференціалом функції та чотирьох аксіомах (началах), подібно аксіомам Евклідової геометрії. Аксіоми визначені із узагальнення набутого досвіду [2].

Перше начало випливає із закону збереження енергії (лікарів за фахом) Ю.Майєра, Г.Гельмгольца, і (пивовара) Д.Джоуля.

Друге начало випливає із робіт С.Карно, В.Томсона, Р.Клаузіуса (ввів поняття ентропії). А.Зомерфельд детально розглянув поняття ентропії, а Гіббс об'єднав перше та друге начало  $dU = TdS - dA$ , де  $U$  – внутрішня енергія,  $S$  – ентропія. Дане співвідношення узагальнює рівноважну термодинаміку і властиве для оборотних процесів. Термодинамічна рівновага для класичної фізики поняття специфічне і вимагає введення нової фізичної величини – температури. Фізичний зміст цього поняття випливає із кінетичної теорії теплового руху частинок. За рівноваги – це середня енергія теплового руху. В узагальненій формі температура є мірою середньої енергії теплового руху молекул. Друге начало термодинаміки визначає напрям протікання процесів у природі.

Поняття теплота пов'язане із способом передавання енергії, без зміни зовнішніх параметрів [5, с. 25].

Теплова теорема Нернста є третім началом термодинаміки, яке говорить, що незалежно від того у якому рівноважному стані знаходиться

система за абсолютного нуля температури приріст ентропії (міри безпорядку у системі) прямує до граничного значення [4].

Четверте начало термодинаміки свідчить про те, що макроскопічна система за незмінних зовнішніх умов завжди самостійно приходить в стан рівноваги: параметри системи не змінюються, для порушення її рівноваги необхідний зовнішній вплив [3]. Це означає, що в ізольованій системі незалежно від початкових умов у ній встановиться термодинамічна рівновага, а відповідно однакова температура.

Таким чином у стані термодинамічної рівноваги система «не пам'ятає минулого», а описує те, що є. Термодинаміка незворотних процесів виникла як результат поступового розвитку й узагальнення класичної термодинаміки і феноменологічної кінетики. Чітке розділення рівноважних та нерівноважних процесів здійснилося майже через 100 років їх паралельного існування та розвитку. Перші роботи, які заклали фундамент класичної термодинаміки і термодинаміки незворотних процесів, з'явилися майже одночасно.

У 1822 р. вийшла робота Ж.Б.Ж.Фур'є «Аналітична теорія тепла». У ній він встановив загальні закони теплопровідності і математично їх обгрунтував через похідні, хоч за основу брав теорію теплороду. Висловив ідею відкритої неізольованої системи [6].

На два роки пізніше, у 1824 р. була надрукована робота С.Карно «Роздуми про рухому силу вогню». У ній вчений сформулював положення про еквівалентність роботи і теплоти (перше начало). Показав, що корисну роботу можна отримати тільки при переході тепла від нагрітого тіла до більш холодного (друге начало), ввів поняття кругового і оборотного процесів [7, с. 182].

Таким чином час і похідні часу містились тільки в праці Ж.Фур'є; у дослідженні С.Карно час не фігурував. Пройшов час, перш ніж стало зрозуміло, що термодинаміка фактично є термостатикою, а рівняння Фур'є-Ома-Фіка і Нав'є-Стокса - ембріон майбутньої нерівноважної термодинаміки.

Тривалий час лише зрідка друкувалися праці, у яких робились спроби знайти рівняння, які містили б похідні часу, вирази, що відображали б незворотність [8].

Характеристика принципу Больцмана вдало дана А. Зоммерфельдом: «Висічена на пам'ятнику Больцману на Віденському кладовищі ця формула панує на фоні хмарин, що пливуть над могилою великого Больцмана. Неважливо, що сам Больцман ніколи не писав цієї формули. Це зробив Планк у першому виданні лекцій з теорії теплового випромінювання (1906 р.). Планку же належить уведення постійної  $k$ . Сам Больцман говорив тільки про пропорційність між ентропією і логарифмом ймовірності станів. Термін "принцип Больцмана" був введений Ейнштейном» [9].

Розвиток термодинаміки реальних агрегатних станів: стиснених газів, рідин, кристалів, термодинаміка хімічних процесів у розплавах та концентрованих розчинах, термодинаміка оптичних явищ й сильно стиснутих газових фазах привів до створення термодинаміки нерівноважних, неізольованих систем, фізики нерівноважних станів, самоорганізації та дисипативних структур. Таким чином парадокс часу заставив звернутися до проблеми ролі «законів природи», адже саме незворотності часу вимагає існування таких утворень як вихори у газодинаміці, лазерне когерентне випромінювання та всі інші нелінійні явища.

Для вивчення нерівноважних процесів як і у рівноважних системах складаються рівняння балансу. Але уже у відкритій системі для маси, енергії, імпульсу, ентропії складових елементів цієї системи. Такі рівняння розглядаються спільно з рівняннями, які описують функціонування системи. І.Р.Пригожин звернув увагу на порушення другого начала термодинаміки при розгляді таких систем. Звідси і пішла термодинаміка нерівноважних систем. Дослідження вченого привели до висновку, що до таких систем належать і жива природа. Друге начало термодинаміки нічого не говорить про те, що відбувається в неізольованих системах, які є відкритими для обміну енергією та речовиною із зовнішнім середовищем. Тому для опису

таких систем недостатньо традиційних параметрів функцій стану. Тут має місце швидкість зміни системи у часі та просторі, іншого статусу набуває поняття часу, його спрямованість. Крім цього виникають градієнти температури, концентрації потоків, а відповідно порушується симетрія та статистична рівновага. Термодинамічний опис рівняннями Менделєєва-Клапейрона чи рівняннями молекулярно-кінетичної теорії втрачає зміст. У системі, де здійснюється обмін, наприклад енергією не можна оперувати поняттям температури. Одночасно у такій системі є намагання повернути її у стан рівноваги згідно четвертого начала термодинаміки. У одержаній відкритій нерівноважній системі постійно здійснюється протиборство між потоками переносу енергії та речовини, які порушують рівновагу та напрям протікання процесів, які намагаються повернути систему до стану рівноваги. Такі протиборства приводять до створення у системі, що розглядається локальних (всередині системи) областей термодинамічної рівноваги. Таку ідею виникнення локальних ділянок рівноваги вперше висловив І.Р.Пригожин. На основі цього можна описувати широкий клас явищ із незворотними потоками, що мають невеликі градієнти лінійними функціями опису термодинамічних сил. Тоді говорять про лінійну термодинаміку незворотних процесів. Тут має місце поєднання лінійного співвідношення взаємних потоків енергії, речовини та сил із навколишнім середовищем із нелінійною нерівноважною термодинамікою. До початково нерівноважних систем відносяться дифузія масопереносу, теплопереніс, проходження струму.

Коли має місце невелике відхилення термодинамічної системи від рівноважного стану, то потоки теплоти, електричних зарядів, частинок через речовину пропорційні градієнтам відповідних термодинамічних змінних. Їх значення у певній точці простору та у часі можна обрахувати за рівняннями та термодинамічними потенціалами рівноважної термодинаміки. Розділ фізики, де розглядаються такі процеси називається лінійною нерівноважною термодинамікою. Закони збереження відображаються рівняннями

неперервності. Термоелектричні явища у твердих тілах створюються градієнтом не лише температури, а й градієнтом потоків заряджених частинок (електричним струмом). В цьому зв'язку принцип Онсагера відображає фундаментальну закономірність таких процесів, згідно якого матриця кінетичних коефіцієнтів є симетричною.

Розгляд ефекту Зеебека щодо виникнення електрорушійної сили в нерівномірно нагрітому провіднику з точки зору нерівноважних процесів є оберненим до ефекту Томсона, коли виділяється тепло за проходження струму. Зв'язок між реакцією термодинамічної системи на зовнішнє збурення та затуханням флуктуацій системи виражається теоремою про флуктуативно-дисипативну взаємодію.

Отже друге начало термодинаміки, яке ще називається законом не спадання ентропії говорить, що еволюція термодинамічних систем забезпечує збільшення порядку в них, що привело деяких вчених до ідеї теплової смерті, коли всі процеси завершилися. Проте у природних явищах перемога порядку над безпорядком є продовженням життя. Закон не спадання ентропії не працює для відкритих термодинамічних систем, які далекі від рівноваги. Тоді можливий притік негативної ентропії і стають дозволеними процеси самоорганізації. В цьому випадку виникають складні впорядковані структури, які вивчаються у теорії самоорганізації.

Таким чином термодинаміка нерівноважних процесів є загальновизнаною фізичною теорією макроскопічного опису нерівноважних процесів. Вона здатна описати динаміку теплоти, гідродинамічні швидкості та концентрації компонентів суміші. У таких процесах термостатика є безсилою. Термодинаміка нерівноважних процесів здатна досить точно дослідити процеси зростання ентропії, обчислити її кількість у кожній визначеній для цього одиниці об'єму простору та в одиниці часу, врахувавши кінетичні властивості через введення коефіцієнтів.

І.Р.Пригожин довів реальність існування нерівноважних термодинамічних систем, які за визначених умов, поглинаючи масу й



енергію з навколишнього простору, можуть здійснювати якісний стрибок до ускладнення. Такі структури названі дисипативними. Особливістю є те, що такий стрибок є передбачуваним, виходячи з класичних законів статистики. Такі системи названі ім'ям Пригожина. Вчений у 1947 р. довів теорему про мінімум виробництва ентропії у відкритій системі: за зовнішніх умов, що перешкоджають досягненню системою рівноважного стану, стаціонарний стан системи відповідає мінімальному виробництву ентропії.

Нерівноважність може слугувати джерелом організації й порядку на основі математичної моделі з незалежними від часу нелінійними функціями, які описують обмін із зовнішнім середовищем енергією та речовиною і спонтанно себе вивести зі стану рівноваги. Цей висновок знайшов своє використання в органічній хімії і відомий як нестабільність Бенара, коли шари легкокорухомого рідкого середовища підігрівають знизу. За високих температурних градієнтів через рідину передається тепло і велике число молекул рідини утворюють фігури, які нагадують бджолині соти, рис. 1 [10].

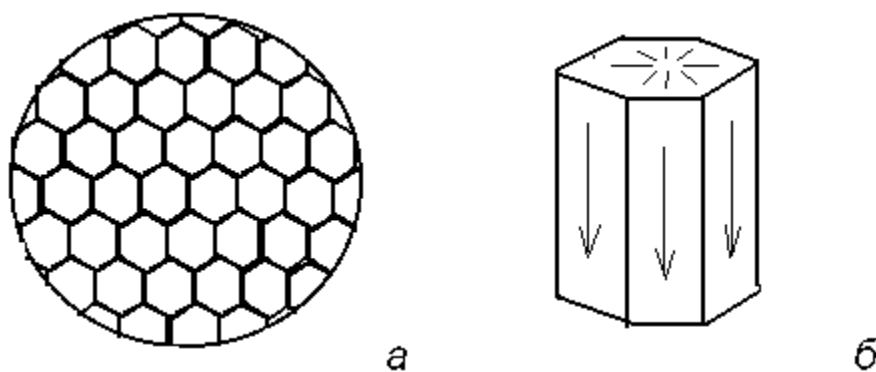


Рис. 1. Осередки Бенара. а) - загальний вид структури; б) - окремий осередок.

Така структура одержана у ртуті, яку налили на широку плоску посудину. Коли градієнт температури перевищує критичне значення, стовпик ртуті розпадається на вертикальні шестигранні призми, де встановлюється певне співвідношення між стороною та висотою призми. По центру призми рідина піднімається, а біля вертикальних граней вона опускається. між нижньою та верхньою поверхнями рідини виникає різниця температур

$\Delta T = T_2 - T_1 > 0$ . Для докритичних різниць температур рідина залишається у спокої. З нижніх шарів тепло передається верхнім за рахунок теплопроводності. Коли температура підігріву досягає критичного значення  $T_2 = T_{кр}$  виникає конвекція. Утворюється дисипативна структура.

За рівноваги температур  $T_2 = T_1$ ,  $\Delta T = 0$ . Якщо підводити тепло до нижнього шару короткочасно, температура стає однорідною. Збурення затухає і стан зберігається стійким.

Коли підігрів здійснюється тривалий час аж до критичного стану відбувається перенесення тепла знизу доверху, а потім випромінювання у зовнішнє середовище. Тоді температура, густина, тиск у рідині будуть неоднорідними і лінійно змінюватися від нагрітої області, рис. 2.

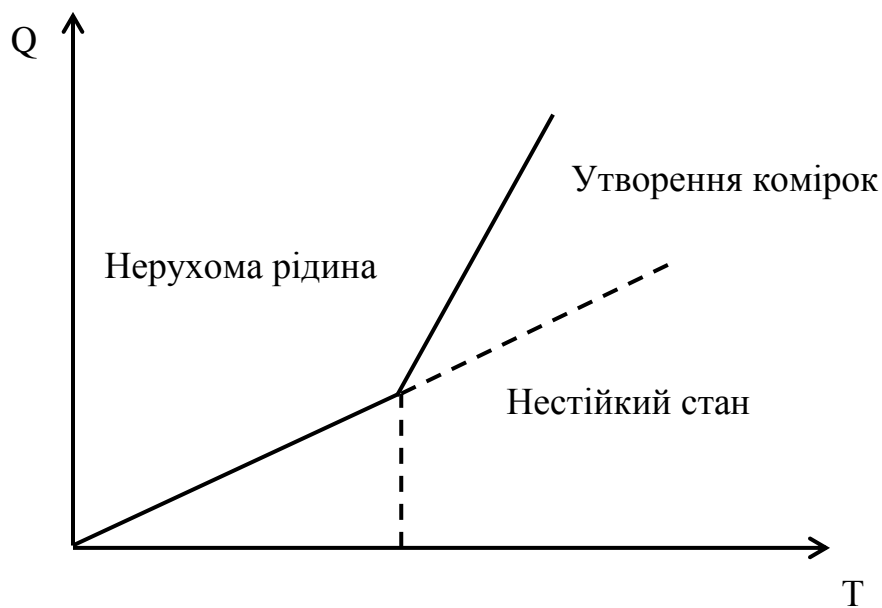


Рис. 2. Діаграма станів у тонкому шарі рідини

Подальше збільшення різниці температур приводить до подальшого відхилення системи від положення рівноваги. Стан рухомої рідини, яка проводить тепло стає нестійким. Він змінюється стійким станом і утворенням осередків, рис. 2. При великих різницях температур рідина, яка знаходиться у стані спокою не забезпечує велике перенесення тепла, вона змушена рухатися узгодженим способом.

В багатьох місцях земної кулі спостерігається немало порід шестигранної чи іншої форми, рис. 3.



Рис. 3. Природні колони з багатогранними комірками [11].

Учені передбачають, що подібні колони є результатом поступового охолодження викинутої вгору магми по максимальному температурному градієнту. При кристалізації вона кристалізується і приймає своєрідну форму. Породи, з яких виникають стовпчасті колони, як правило, шестигранної форми частіше всього є базальтами і долеритами.

Дослідники Горинг та Моррис (США) перевірили гіпотезу створення таких колон на прикладі дослідів із водного розчину крохмалу з кукурудзи, який поступово нагрівається, а потім поступового охолодження з різною швидкістю. В результаті одержали колони, які схожі на природні. Досліди показали, що чим повільніше охолоджується суміш (реально лава), тим крупніші будуть плити та стовпи. Мало місце виникнення й восьмигранників та інших структур. Автори дослідів знайшли коефіцієнт зв'язку швидкості охолодження (чи висихання) та кількості граней комірок [11].

Комірки одержуються і у випадку поступового висихання корки грязі, розтріскуванні льоду весною.

Аналогічні досліді можна поставити з лейкоподієм.

Для одержання комірок Бенара можна взяти дрібний порошок тальки чи муки і розмішати їх у сіліконовому маслі. Після цього розчин поміщається у сковородку і повільно рівномірно підігрівається знизу, рис. 4.

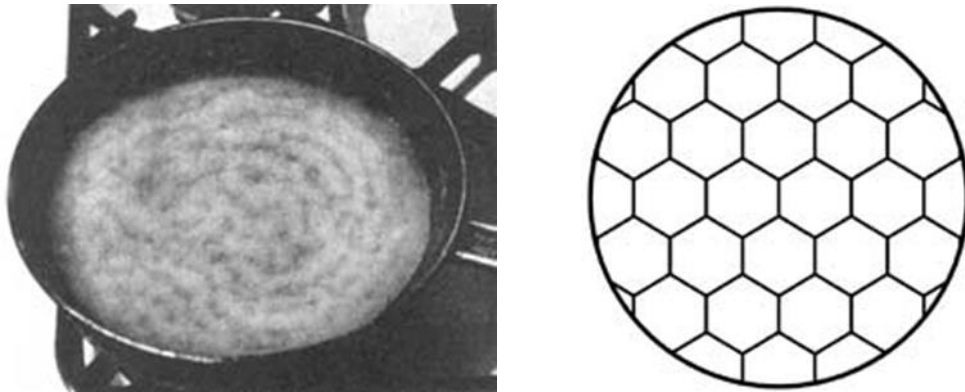


Рис. 4. Комірки Бенара на сковородці та модель комірок

За плоского дна сковородки температури у нижній та верхній частині розчину будуть однаковими  $T_1$  у нижній частині та  $T_2$  у верхній частині. Коли різниця температур невелика, то частинки будуть нерухомі. Із її збільшенням настає момент, коли вся поверхня середовища розбивається на шестигранні комірки правильної форми. У центрі кожної комірки рідина рухається вгору, а по краях вниз. Якщо взяти декілька сковородок, то утворені комірки практично будуть однакові. Якщо змінити форму сковородки, то можна одержати дещо змінені форми. Такі комірки називаються комірками Бенара.

Самовільні прояви всередині магми, що застила у вигляді шестигранників є явищем утворення порядку із хаосу. Такі прояви є рідкісними, але цікавими для дослідників. Як правило, самовільні процеси проходять із руйнацією структур – розпадом атомного ядра, розщеплення складних молекул на прості. Такі процеси є самовільні і необоротні.

З фізичної точки зору явище виникнення конвекції у рідині, коли величезна маса молекул зненацька створює погоджений рух і утворює конвективні шестигранні комірки можливе за однакових (майже однакових) швидкостей молекул. Безумовно така поведінка молекул суперечить принципу порядку Больцмана, коли хаотичний рух молекул різко змінив свою природу. Якраз тут І.Р.Пригожин розглянув нестійкість Бенара як

спонтанну самоорганізацію структур і утворення порядку із хаосу. Такий висновок він пояснював як флуктуацію, що стабілізується шляхом обміну із навколишнім середовищем енергією та речовиною. Тоді у класичній термодинаміці тепловий потік є джерелом втрат енергії, а у комірках Бенара він є джерелом порядку. Нерівноважний стан підтримується за рахунок притоку до системи енергії (тепла), формуючи умови, де мільйони молекул узгоджено рухаються і створюють шестигранні конвекційні шестигранники.

І.Р.Пригожин дослідив хімічні реакції, у яких спостерігаються виразні автоколивання. Таку реакцію окислення лимонної кислоти броматом калія у кислотному середовищі в присутності іонів церія вперше спостерігав Б.Білоусов у 1951 р. Сутність автоколивання полягала у тому, що колір розчину змінювався від безколіорового до жовтого і навпаки. Інший дослідник О.Жаботинський пояснив механізм явища і побудував математичну модель коливальної поведінки. Звідси пішла назва – хімічного годинника [12].

У іншому досліді розглядалася реакційна суміш із фероїном, де брали участь червоні та сині молекули. З класичної фізичної точки зору рух молекул є хаотичним і концентрація синіх та червоних молекул буде коливатися від середини. Тоді колір буде фіолетовим з нескінченими переходами в сторону синього і червоного. Проте спостерігалось інше. Колір чисто синій різко змінюється на чисто червоний, потім на синій і т.д. Має місце погоджені хімічні перетворення, які створюють так званий хімічний годинник.

У 1969 р. О.Жаботинський виявив виникнення хвиль зміни концентрації у тонких плоских шарах реагуючої суміші, рис. 5.

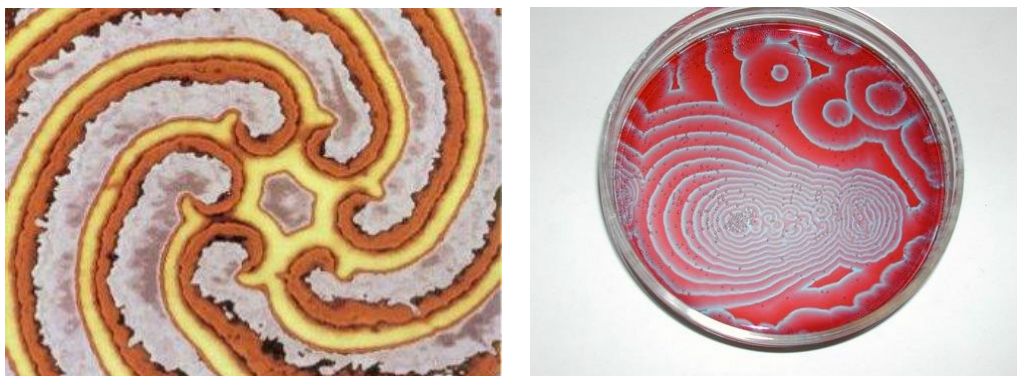


Рис. 5. Хвилі зміни концентрації в реагуючій суміші.

І.Р.Пригожин вказував на високу впорядкованість поведінки мільярдів молекул, що видається неправдоподібним, але прояв хімічного годинника є підтвердженням істинності процесу. Безумовно важко було уявити такі автоколивання і вчений світ визнав їх лише через 8 років після відкриття [12].

Коли приготувати гарячий чай чи кофе, то можна помітити узор на їх поверхні, подібні коміркам Бенара.

Поверхні озер, солончаків, які висохли є результатом турбулентних конвекційних процесів.

Фігури Хладні І.Р.Пригожин не розглядав, але частина дослідників віднесли їх до автоколивань, які породжені коливальними процесами.

Вчені стверджують, що шестикутна форма є оптимальною для максимально корисного використання одиниці площі і мінімальної кількості будівельного матеріалу.

Проте вивчення природних многогранників не дали відповіді на питання: чому колони є вертикальними? Чому мають форму правильного многогранника? Чому магма, що охолоджується лише інколи створює правильну форму колон, коли у більшості цього не проявляється?

**Висновки.** Таким чином термодинаміка Пригожина виникла на основі дослідження відкритих систем, де матерія або енергія, чи одночасно матерія і енергія обмінюються із зовнішнім середовищем. Це була висхідна ідея дослідження. Вивчалось явище, коли кількість матерії та енергії з часом

збільшується чи зменшується.

Література:

1. Осипов А.И. Самоорганизация и хаос. - М.: Знание, 1986. - 64 с. . 2.
- Зоммерфельд А. Термодинамика и статистическая физика. - М.: Изд-во иностр. лит., 1955. - 480 с.
3. А. Г. Самойлович. Термодинамика и статистическая физика. — М.: Гостехиздат, 1955. — С. 10. — 368 с
4. Матвеев А. Н. Молекулярная физика, М., Высш. шк., 1987. – 360 с.
5. Базаров И.П. Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1991. - 376 с.
6. Жан-Батист-Жозеф Фурье, Аналитическая теория тепла, цитируется по: Жизнь науки. Антология вступлений к классике естествознания / Сост.: С.П. Капица/ - М.: «Наука», 1973. - С. 151.
7. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб,- К.: Техніка, 2008. - 648 с.
8. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. - М.: Наука, 1983. - 528 с.
9. Лучицький Р. Особливості формування сучасного наукового світогляду в процесі викладання фізики у вищому навчальному закладі: синергетичний підхід.
10. [http://mirslouvrei.com/content\\_fil/PRIGOZHIN-ILJA-ROMANOVICH-R-1917-15828.html](http://mirslouvrei.com/content_fil/PRIGOZHIN-ILJA-ROMANOVICH-R-1917-15828.html).
11. [http://merkab.narod.ru/hologram\\_universe/hologram\\_universe01.html](http://merkab.narod.ru/hologram_universe/hologram_universe01.html).
12. Мучник Г.Ф. Упорядоченный беспорядок, управляемые неустойчивости. «Химия и жизнь», №5, 1985
13. Садовий М.І. Вибрані питання загальної методики навчання фізики: [навч. посібн. для студ. ф.-м. фак. вищ. пед. навч. закл.] / Садовий М.І., Вовкотруб В.П., Трифонова О.М. – Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2013. – 252 с.
14. Садовий М.І. Перспективи застосування ІКТ при навчанні фізики для підвищення якості освіти / М.І. Садовий, О.М. Трифонова. // Вища освіта України: теоретичний та науково-методичний часопис. – Луцьк, 2013. – № 2 (додаток 2) – Тематичний випуск: «Науково-методичні засади управління якістю освіти у вищих навчальних закладах». – С. 428-434.
15. 10. Трифонова О.М. Взаємозв'язки принципів науковості та наочності в умовах кредитно-модульної системи навчання квантової фізики студентів вищих навчальних закладів: дис. ... канд пед. наук : 13.00.02 / Трифонова Олена Михайлівна. – Кіровоград, 2009. – Т. 1. – 216 с.; Т. 2 : Додатки. – 301 с.

### **Відомості про автора.**

**Садовий Микола Ілліч** –доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики та методики її викладання, завідувач кафедри теорії та методики технологічної освіти, охорони праці і безпеки життєдіяльності.

**Коло наукових інтересів:** дидактика фізики та технологічної освіти.