

Передумови виникнення та становлення синергетики

Розглянуто передумови виникнення та становлення міждисциплінарного напрямку в науці – синергетики (середина XIX ст. – 70-ті рр. XX ст.). Показано внесок І.Р. Пригожина з нерівноважної термодинаміки в формування синергетики, або загальної теорії самоорганізації систем різної природи. Проаналізовано праці Германа Хакена (дав визначення поняття «синергетика», вказав на подібність процесів самоорганізації, що відбуваються в фізичних, хімічних, біологічних об'єктах, запропонував єдиний підхід).

У фізиці XVIII–XIX ст. домінуюче місце займала динамічна базова модель. Вона ґрунтувалась на моделі фізичного простору-континууму і на класичній механіці. Важливе місце в цій моделі належить концепції однозначності зв'язків, динамічним закономірностям, тобто класичному детермінізму [1]. Ця концепція сприяла формуванню уявлення про практичні обмеження можливостей передбачити поведінку системи. Класична фізика, побудована І. Ньютоном та його послідовниками, почала руйнуватися під дією нових фактів, які неможливо було пояснити в рамках існуючих теорій [2].

На початку 50-х рр. XIX ст. виникла термодинаміка – наука про загальні теплові властивості макроскопічних тіл.

У 1861–1865 рр. Дж. Максвелл створив загальну теорію електромагнітних процесів, що поклало початок статистичній механіці. Він вказав на принципову відмінність механіки окремої частинки від механіки сукупності частинок, підкресливши, що великі системи характеризуються параметрами, такими як тиск, температура тощо. Методи дослідження сукупності частинок не є застосовними до окремої частинки [3].

Теорія електромагнітного поля Максвелла набула подальшого розвитку у працях Г. Герца, О. Хевісайда, Г. Лоренца, у результаті чого наприкінці XIX ст. було створено електродинамічну картину світу [4–6]. У ній змінились змінні стану

та форма динамічного закону (рівняння Максвелла). Подальший розвиток цієї теорії поглибив її протиріччя з класичною механікою і привів до революційних змін у науці. Стан системи став задаватися не координатами та швидкостями, як у класичній механіці, а векторами полів та потенціалами.

З формуванням класичної статистичної механіки (Дж. Максвелл, Л. Больцман, Р. Клаузіус, Дж. Гіббс) пов'язана поява ймовірнісних уявлень та статистичних законів [7, 8, 9]. У працях Дж. Максвелла та Л. Больцмана започатковано також думку, що більшість фізичних законів має статистичний (ймовірнісний) характер. Виникає розуміння двох рівнів реальності, які описуються різними моделями: динамічною і статистичною. В основу як динамічного, так і статистичного описання покладено положення про однорідність, однозначність характеру руху. З утвердженням уявлень про статистичний характер класичної механіки на зміну простоті динамічної моделі прийшли складність, нерегулярність, невизначеність, неінтегрованість, неможливість алгорифмувати, непередбачуваність тощо.

Уявлення про незворотність процесів порушило універсальний характер механічних законів.

Нові факти формували нові уявлення. Зокрема, Р. Клаузіус увів принцип елементарного безладу. Оскільки простежити за рухом кожної молекули газу неможливо, слід визнати обмеженість

своїх можливостей і те, що закономірності, які спостерігаються в поведінці маси газу як цілого, є результатом хаотичного руху його молекул. Безлад при цьому розуміється як незалежність координат і швидкостей окремих частинок у стаціонарному стані. Р. Клаузіус першим увів у теоретичну фізику статистичний метод, систематичне використання якого здійснив Дж. Максвелл [10]. Зокрема, у 1878 р. Дж. Максвелл увів поняття ансамблю станів, на основі якого розглянув статистичний розподіл N тотожних систем [11]. Статистичний ансамбль являє собою сукупність великої кількості однакових фізичних систем, складених з багатьох частинок, які перебувають в однакових макроскопічних станах і описуються функціями розподілу частинок за швидкостями та імпульсами.

Ідею ансамблю підхопив Л. Больцман, який чіткіше сформулював ідею безладу і поклав її в основу молекулярно-кінетичної теорії. Ідея елементарного безладу (або хаосу) усунула протиріччя між механікою та термодинамікою. Незалежно концепцію статистичного ансамблю розробляв Дж. Гіббс, який використав її для одержання рівноважних розподілів імовірностей перебування систем, що складаються з великої кількості частинок (ансамблів), у станах, що реалізуються в різних фізичних умовах (розподіли Гіббса). У 1901 р. він запровадив великий канонічний та мікроканонічний розподіли, які відповідають великому канонічному ансамблю Гіббса та мікроканонічному ансамблю Гіббса [12].

На основі статистичного підходу вдалося поєднати оборотність окремих механічних явищ (рухів окремих молекул) і незворотний характер руху їх сукупності (зростання ентропії в замкнутій системі). Надалі виявилось, що ідеї безладу (хаосу) є характерними не тільки для явищ теплових, вони більш фундаментальні. При вивченні теплового випромінювання виникли суперечності: теорія електромагнітного поля Максвелла описувала оборотні процеси, але процеси обміну світловою енергією між тілами, що знаходяться при різних температурах, ведуть до вирівнювання температур, тобто повинні розглядатися як необоротні.

Перехід від класичної фізики до не-класичної характеризувався не тільки

новими ідеями, відкриттям нових явищ, але й становленням нового способу мислення, зміною методологічних принципів науки.

Фундамент неklasичної фізики було закладено спеціальною теорією відносності та квантовою теорією. Відбулося створення нової фізичної картини світу – квантово-релятивістської. У 1905 р. А. Ейнштейн розробив спеціальну теорію відносності [13]. Раніше М.Планк ввів поняття кванта, що мало узгодити попередні та нові уявлення, але в дійсності руйнувало уявлення класичної фізики [14, 15]. А. Ейнштейн стосовно цього зазначив: «Це відкриття стало основою всіх досліджень у фізиці ХХ ст. і з того часу майже цілком зумовило її розвиток. Більш того, воно зруйнувало кістяк класичної механіки та електродинаміки і поставило перед наукою завдання – знайти нову пізнавальну основу для всієї фізики» [13, с. 257]. Планк запропонував гіпотезу «природного випромінювання», аналогічну до гіпотези молекулярного безладу. Вона полягає в тому, що окремі електромагнітні хвилі, з яких складається теплове випромінювання, ведуть себе незалежно і є некогерентними. Ця гіпотеза сприяла формуванню уявлення про квантовий характер випромінювання, яке обґрунтовувалося за допомогою теорії ймовірностей. Ідея кванта енергії Планка поклала початок теорії квантів світла. Хаотичність випромінювання виявилася пов'язаною з його дискретністю. За допомогою квантового підходу М. Планк і А. Ейнштейн дали пояснення низки законів і явищ (закон Стефана-Больцмана, закон зміщення Віна, закони фотоэффекту тощо), які не можна було пояснити з погляду класичної електродинаміки.

На початку ХХ ст. французький учений А. Пуанкаре припустив, що поблизу кожного тіла є деякі малопомітні фактори і явища, які можуть викликати нерегулярності. Поведінка навіть простої системи істотно залежить від початкових умов, так що не все можна передбачити. Зокрема, як приклад залежності від початкових умов він навів конус, який стоїть на своєму вістрі: найменше початкове відхилення викличе його падіння. Тобто,

малі причини викликають значні наслідки [16]. При розгляді задачі трьох тіл А. Пуанкаре виявив також існування фазових траєкторій, які вели себе заплутано і складно [17]. На той час на цю роботу особливої уваги не звернули.

А. Пуанкаре та радянський учений О.М. Ляпунов створили якісні методи розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь [18]. За їх допомогою можна вивчати поведінку системи, досліджувати властивості розв'язків рівнянь без знаходження самих розв'язків: головна увага приділяється типу розв'язку. Тобто, відбувся перехід до вивчення характеристик вищого рівня – перехід від окремого об'єкту до вивчення класу об'єктів, які мають загальні властивості, тобто виділялись універсальні властивості. На зміну локальному підходу прийшло глобальне описання, поведінка системи розглядалася на всьому фазовому просторі. У 20–30-х рр. ХХ ст. російська теоретична школа вихідця з України Л.І. Мандельштама вперше використала якісні методи для вивчення тільки чисто періодичних режимів нелінійних коливань, побудувавши їх теорію. У 1931 р. Л.І. Мандельштам уперше застосував термін “нелінійні коливання” [19]. Він підкреслив необхідність створення порядку з лінійною коливальною культурою нової нелінійної коливальної культури, вироблення нелінійної інтуїції. У першому систематичному викладі теорії нелінійних коливань – праці О.О. Андрюнова, і С.Е.Хайкіна «Теорія коливань» (1937) – було введено топологічний інваріант – поняття грубості, поняття про грубі системи. Грубі системи – це клас динамічних систем, у яких топологічна структура фазових траєкторій не змінюється при малих змінах диференціальних рівнянь [20].

Створення загальної теорії коливань у школі Л.І. Мандельштама відкрило нові можливості її застосування в радіофізиці та інших галузях науки і техніки, зокрема, в акустиці, механіці, теорії регулювання. Паралельно українськими вченими М.М. Криловим та М.М. Боголюбовим у 30-х рр. ХХ ст. у Києві розроблявся асимптотичний напрямок цієї теорії – нелінійна механіка. У Києві сформувалася школа з нелінійної механіки [21–25].

У 30–40-х рр. радіофізика сформувалась як окрема галузь науки, поняття нелінійні коливання, нелінійні системи, нелінійна фізика, нелінійність стали міждисциплінарними поняттями. Нелінійне мислення міцно ввійшло у світогляд багатьох учених.

У ХІХ ст. існувало протиріччя в розумінні еволюції. Р. Клаузіус у статті «Про рушійну силу теплоти» (1850) сформулював (незалежно від У. Томсона) другий початок термодинаміки наступним чином: «Теплота не може перейти сама собою від тіла більш холодного до більш теплого». У 1865 р. він запровадив для термодинамічної системи поняття ентропії (від грецького слова «τροπή – перетворення, поворот») як міри необоротного розсіяння енергії термодинамічною системою (міри необоротності процесу). Використання цього поняття дозволило йому сформулювати другий початок термодинаміки для оборотних процесів у іншому вигляді. Тоді ж він показав, що при необоротних процесах в адіабатичних ізольованих системах ентропія може тільки зростати, набуваючи найбільшого значення у стані теплової рівноваги. Так він дійшов до хибного висновку, що Всесвіт повинен прийти у стан повної термодинамічної рівноваги, або «теплової смерті» [26].

У працях Дж. Гіббса класична термодинаміка як розділ фізики, що вивчає найзагальніші властивості макроскопічних систем у станах термодинамічної рівноваги та процеси переходу між ними, дістала завершення; було започатковано рівноважну статистичну термодинаміку, яка обґрунтовує закони рівноважних термодинамічних процесів та обчислює термодинамічні характеристики фізичних систем [9].

Створена в працях Дж. Максвела, Дж. Гіббса, Р. Клаузіуса термодинаміка постулювала розвиток довільних систем у бік їх спрощення, збільшення ентропії. Однак, створена Ч.Дарвіном еволюційна теорія вказувала на ускладнення біологічних систем, на їх антиентропійний розвиток. Ще більше ця проблема загострилась після відкриття на початку ХХ ст. різних фізичних, а потім і хімічних ефектів, пов'язаних з довільним виникненням стійких систем, що самоорганізуються, з хаосу.



І.Р. Прігожин

Розв'язання даного протиріччя в розумінні еволюції та пояснення явища самоорганізації відбулося в 30-х рр. ХХ ст. у працях школи бельгійського фізика, лауреата Нобелівської премії І.Р. Прігожина з нерівноважної термодинаміки.

Г. Ніколіс та І. Прігожин писали: «Пошук розв'язку, що дозволяє здолати труднощі, пов'язані з неінтегрованими системами, привів до загальної наукової революції, у результаті чого на початку 50-х рр. виникла нова галузь у механіці» [27, с.140]. Розширилися галузі застосування нерівноважної термодинаміки та статистичної фізики необоротних процесів, у їх рамках виникли нові напрями, зокрема міждисциплінарні [28–30].

Розширився й наповнився новим змістом понятійний апарат нерівноважної термодинаміки та статистичної фізики необоротних процесів, урізноманітнилися використовувані математичні методи. В їх арсенал увійшли такі поняття, як дисипативні системи і структури, термодинамічні сили і потоки, динамічний хаос, дивні аттрактори, керуючий параметр, нелінійність, нелінійні системи, нелінійні процеси, біфуркації тощо.

Важливим є поняття дисипативної структури як стійкої просторової неоднорідної структури, що виникає внаслідок розвитку нестійкостей в однорідному рівноважному дисипативному середовищі (системі), яке запровадив у 40-х рр. І. Прігожин. Він указував: «Моделі, розглядом яких займалася класична фізика, відповідають, як ми тепер розуміємо, тільки граничним ситуаціям, які можна створити штучно... Штучне може бути детермінованим та оборотним. Природне ж обов'язково містить елементи випадковості та необоротності. Це приводить нас до нового погляду на роль матерії у Всесвіті. Матерія – більше не пасивна субстанція, описувана в рамках механістичної картини світу, їй також притаманна спонтанна активність. Відмінність нового погляду на світ від традиційного настільки глибока, що... ми можемо з повним правом говорити про новий діалог людини з природою» [31, с.22–23]. «У сильно нерівноважних умовах може відбуватися перехід від безпорядку, теплового хаосу, – до порядку. Можуть виникати нові динамічні стани матерії, що відображають взаємодію даної системи з навколишнім середовищем. Ці нові структури ми назвали дисипативними, намагаючись підкреслити конструктивну роль дисипативних процесів у їх утворенні... Справді, закони рівноваги мають високу спільність: вони універсальні. Щодо поведінки матерії поблизу стану рівноваги, то їй властива повторювальність. Водночас удалині від рівноваги починають діяти різні механізми, що відповідають можливості виникнення дисипативних структур різних типів..., спостерігаються також процеси самоорганізації...» [31, с.25–26]. Акцентується увага на процесах еволюції, розвитку та руйнування систем. Вважається, що нерівноважні стани, хаос відіграють важливу роль у процесах розвитку та руху систем. Вони є необхідною умовою появи нової організації, порядку, нових систем, еволюції. Самоорганізація, результатом якої є створення з хаосу нових структур, відбувається тільки в системах достатньо складних, коли позитивні зворотні зв'язки переважають негативні.

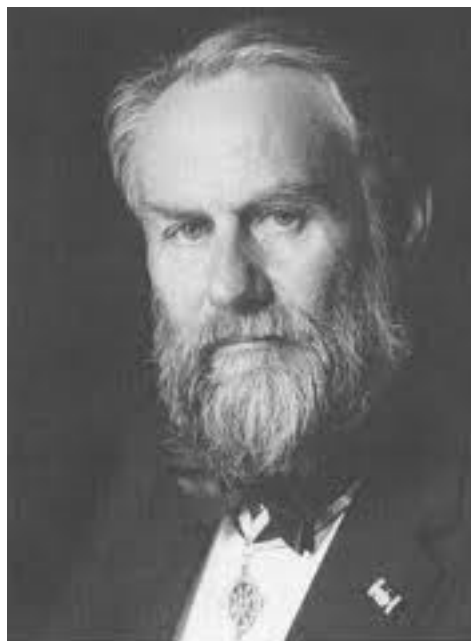
У нерівноважних дисипативних системах з макроскопічно великою кількіс-

то ступінів свободи в результаті еволюції відбувається виділення невеликої кількості змінних, які називають параметрами порядку і які визначають динаміку системи. У результаті в системі встановлюються регулярні стійкі структури — відбувається самоорганізація, під якою розуміють спонтанне самоускладнення форми (у загальнішому випадку — структури системи та законів її функціонування) унаслідок повільної та плавної зміни її параметрів. Іншими словами, самоорганізація — це утворення впорядкованих структур із хаосу.

Системи в фізиці нерівноважних процесів Прігожина є відкритими і дисипативними. «Коли система, еволюціонуючи, досягає точки біфуркації, детерміністичне описання стає непридатним. Флуктуація змушує систему вибирати ту гілку, по якій буде проходити подальша еволюція системи. Перехід через біфуркацію — такий же випадковий процес, як підкидання монети... У випадку нерівноважних процесів... флуктуації визначають глобальний результат еволюції системи. Замість того, щоб залишатися малими поправками до середніх значень, флуктуації істотно змінюють середні значення... Ми пропонуємо назвати ситуацію, яка виникає після дії флуктуації на систему... — порядком через флуктуацію» [32, с. 236—238].

На початку 60-х рр. ХХ ст. наукові уявлення про самоорганізацію в відкритих нерівноважних системах формувалися незалежно в різних науках і обмежувались їх рамками. У 70-х рр. вони стали предметом порівняння, і вчені різних наукових напрямів знайшли в них багато спільного. Однією з характерних рис фізики з 1969 р. стало широке використання результатів, отриманих у деякій галузі, в інших, не обов'язково суміжних. Таке взаємопроникнення ідей і методів одних дисциплін в інші виявилось притаманним усій фізичній науці.

У 70—80-х рр. представники різних дисциплін почали проводити спільні наукові конференції, встановлюється новий науковий напрям — синергетика, або загальна теорія самоорганізації систем різної природи, став зрозумілим її системний характер. У 1972 р. було проведено перший міжнародний симпозіум з синергетики в замку Ельмау в Баварії.



Г. Хакен

Термін «синергетика» запропонував професор Штутгартського університету Герман Хакен. У 1977 р. у праці «Синергетика» він дав визначення цьому поняттю, вказав на подібність процесів самоорганізації, які відбуваються в фізичних, хімічних, біологічних об'єктах, підкреслив необхідність створення єдиного підходу [8]. «Приблизно 25 років тому — писав він — я задав питання: «чи має самоорганізація загальні закони?», і запропонував вивчити це питання в рамках нової дисципліни, яку я назвав синергетикою» (термін «система, що самоорганізується» увів у 1947 р. У. Ешбі). За Г. Хакеном, самоорганізація — це спонтанне утворення високовпорядкованих структур із зародків або навіть із хаосу. Важливу роль у системах, що самоорганізуються, відіграють самопогоджувальні, колективні рухи частинок. Він вважав, що, характерними рисами процесів самоорганізації є: кооперативність дії елементів та підсистем системи; нелінійність процесу, нерівноважний стан, що підтримується за рахунок енергії середовища; пороговий характер процесів самоорганізації. Синергетику він визначив не тільки як науку про

самоорганізацію, але й як теорію «спільної дії багатьох підсистем, у результаті якої на макроскопічному рівні виникає [нова] структура і відповідне функціонування» [33, с. 7]. Тут акцентовано увагу на узгодженій взаємодії частин системи у процесі утворення її структури як єдиного цілого. Синергетика досліджує принципово нерівноважні системи, принципово нелінійні процеси еволюції систем. У системах, що вивчає синергетика, фізик, біолог, хімік, математик бачать свій матеріал, і кожен з них, застосовуючи методи своєї науки, збагачає синергетику новими ідеями і методами.

Завдяки обміну речовиною та енергією з навколишнім середовищем у відкритих дисипативних системах у нерівноважних умовах спостерігається узгоджена поведінка підсистем, внаслідок чого зростає ступінь їх упорядкованості, тобто має місце самоорганізація – встановлення стійких регулярних структур; з хаосу виникає порядок, а необоротність є тим «механізмом», який створює порядок із хаосу. Основні поняття синергетики: нелінійність, складність, принцип підкорення, параметри порядку, відкритість системи, нерівноваженість дисипативних структур і фазових переходів, когерентність, біфуркації, аттрактор, дивний аттрактор, солітон, хаос і порядок тощо. Синергетика дає єдиний принцип описання процесів самоорганізації та процесів руйнування динамічних систем, тобто пояснює перехід від структур до хаосу і навпаки. Вона показує межі застосування законів детермінізму та методів статистики для опису поведінки системи (об'єднує динамічні та статистичні закономірності). Тим самим синергетика сприяє формуванню нового стилю мислення.

Синергетика акцентує увагу на явищах еволюції у відкритих нерівноважних системах, на виникненні порядку з хаосу, явищах самоорганізації. Одна з задач синергетики – з'ясування законів побудови, організації, виникнення впорядкованості. Математичним апаратом, який використовується в ній, є теорія динамічних систем.

Г. Хакен перераховує наступні основні положення синергетики: «1. Систе-

ми, що досліджуються, складаються з декількох або багатьох однакових чи різнорідних частин, які знаходяться у взаємодії одна з одною. 2. Ці системи є нелінійними. 3. При розгляді фізичних, хімічних та біологічних систем мова йде про відкриті системи, далекі від теплової рівноваги. 4. Ці системи схильні до внутрішніх та зовнішніх коливань. 5. Системи можуть стати нестабільними. 6. Відбуваються якісні зміни. 7. У цих системах виявляються емерджентні (які знову виникають) нові якості. 8. Виникають просторові, часові, просторово-часові або функціональні структури. 9. Структури можуть бути впорядкованими або хаотичними. 10. У багатьох випадках можливою є математизація» [34].

Таким чином, головний системний фактор полягає не в хаотичності, а у взаємодії, у динаміці. У хаосі зароджується порядок, упорядкованість.

Другим положенням синергетики є нелінійність. У синергетиці основна увага приділяється вивченню нелінійних математичних рівнянь. Нелінійність проявляє себе як непостійність, багатоманітність, нестійкість, випадковість, наявність точок розгалуження процесів, біфуркації. Точкою біфуркації називають стан максимальної хаотичності нерівноважного процесу (від лат. *bifurcus* – роздвоєний). За якою траєкторією буде далі відбуватися розвиток системи – випадковий процес. Випадковість є необхідним елементом світу: порядок (закон) та безлад (хаос) включають у себе один одного. Випадковість також є творчим початком у процесі самоорганізації. З віддаленням від положення рівноваги зростає кількість розв'язків, станив складної системи. Незначні причини можуть призвести до великих наслідків.

Синергетика має справу з відкритими (що мають джерела енергії) нелінійними системами і стверджує, що світ виникає та розвивається в результаті самодовільних механізмів, що самоорганізуються. В їх основу покладена єдина симетрія форм живої та неживої природи. Синергетика пояснює, чому утворюються саме такі структури. Вона обґрунтовує положення, згідно з яким подібні структури є структурами еволюційними. Функціональна спільність процесів

самоорганізації систем, їх стійкість підтримуються законами ритму (день – ніч, підвищення – спадання у творчій активності людини, у економіці тощо).

Одним з центральних у Г. Хакена є поняття параметрів порядку, під яким розуміються повільні змінні, що підкоряють собі множину змінних, які швидко змінюються, і визначають перебіг макрпроцесу, тобто динамічну структуру. Це поняття він поширює на різні сфери. Прикладами є: мова, національний характер, ритуал, тип державного устрою, суспільна думка, парадигма Т. Куна [35, с. 116–119]. Застосування до таких випадків поняття «параметр порядку» виділяє в них колективний ефект (Г. Хакен вважає його таким, що є «типовою причиною для розвитку нестабільності»), а також ту особливість, що параметр порядку не може бути змінений у результаті діяльності індивіду (підсистеми). Суттєві зміни (революції) можливі лише в ситуації, що близька до нестабільності. Який шлях буде вибрано, залежить від малих флуктуацій (типа дії індивідів). При цьому, «коли система дестабілізована, ми не можемо передбачити... в якому новому стані вона опиниться» [35, с. 116–119].

На відміну від багатьох наук, що виникають на межі двох дисциплін, наприклад, фізичної хімії або хімічної фізики, одна з яких надає новій науці предмет, а інша — метод дослідження, синергетика опирається на методи, однаково застосовні до різних предметних галузей, і вивчає складні системи різної природи.

Якщо в синергетиці Г. Хакена основним є поняття структури як стану, що виникає в результаті когерентної (узгодженої) поведінки великої кількості частинок, то в бельгійській школі основним є поняття дисипативної структури. У відкритих дисипативних системах однорідний стан може втрачати рівновагу і необоротно переходити в неоднорідний стаціонарний стан, стійкий відносно малих збурень — у дисипативну структуру.

Бельгійська школа І. Прігожина розвиває термодинамічний підхід до самоорганізації [36–38].

За час існування в синергетиці змінилось декілька важливих підходів — парадигм. І. Прігожин займався процесами самоорганізації в нелінійних дисипа-

тивних системах. У 70–80-х рр. основна увага приділялась складній неперіодичній поведінці простіших детермінованих систем (динамічному хаосу). Доведено існування границі передбачення поведінки нелінійної системи — «горизонт прогнозу». Вивчено сценарії переходу системи від простої поведінки до хаотичної зміни параметрів.

Синергетиці Г. Хакена передували дослідження Ч. Шеррінгтона, синергія С. Улама та синергетичний підхід Н. Забуського.

Англійській фізіолог Ч.С. Шеррінгтон (1857–1952) називав синергетичним, або інтегративним, узгоджену взаємодію нервової системи при керуванні рухами м'язів. Він розробив концепцію інтегративної діяльності нервової системи.

С. Улам одним з перших перевіряв за допомогою експерименту на ЕОМ гіпотезу розподілу енергії за ступенями свободи. З експерименту, проведеного над числовим аналогом системи кубічних осциляторів, виникла проблема Фермі-Паста-Улама: простеживши за еволюцією розподілу енергії за ступенями свободи протягом багатьох циклів, автори не виявили рівномірного розподілу. С. Улам пояснив це «синергією, тобто неперервною співпрацею між машиною і її оператором».

Розв'язання проблеми Фермі-Паста-Улама отримано у 1965 р. М. Крускалом та Н. Забуським [39]. Вони довели, що система Фермі-Паста-Улама є аналогом рівняння Кортевега-де Фріза і що рівномірному розподілу енергії перешкоджає солітон (термін, запропонований Н. Забуським), який переносить енергію з однієї групи мод у іншу. Розуміючи обмежені можливості використання аналітичного та чисельного підходу до розв'язання нелінійних задач, Н. Забуський зробив висновок про необхідність єдиного синтетичного підходу. Він вважав, що синергетичний підхід до нелінійних математичних і фізичних задач можна визначити як спільне використання звичайного аналізу та чисельної машинної математики.

Отже, синергетика виникла в результаті синтезу та розвитку багатьох наукових напрямів, зокрема нерівноважної термодинаміки, на основі статис-

тичної фізики та розробки якісних методів розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, вивчення якісних змін розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь, що визначають стани, далекі від рівноваги, в залежності від параметрів (зокрема, теорія катастроф). Поряд із терміном синергетика, часто використовують терміни теорія складності, теорія динамічних систем, теорія хаосу, нелінійна динаміка або більш загальний — нелінійна наука, вказуючи при цьому на принципову нелінійність, нерівноважність, складність досліджуваних явищ.

Ю.О. Данилов, один з відомих учених, який працює в галузі синергетики, дав таку характеристику цьому напрямку: «Серед безліч почесних титулів, які приніс нашому століттю прогрес науки, «вік нелінійності», — один з найменш звучних, але найбільш значимих і заслужених... Світ нелінійних функцій так само, як і світ нелінійних явищ, що стоїть за ним, страшить, підкорює і чарівно вабить своїм невичерпним різноманіттям. Тут немає місця чинному стандарту, тут панує мінливість і буйство форм» [40].

1. Лаплас П.С. Изложение системы мира /П. Лаплас. — Л.: Наука, 1982. — С.364.
2. Максвелл и развитие физики XIX-XX века. — М.:Наука, 1985. — 244 с.
3. Максвелл Дж. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля /Дж. Максвелл. — М.: ГИИТЛ, 1952. — 687 с.
4. Григорьян А.Т., Вяльцев А.Н. Генрих Герц /А. Григорьян, А. Вяльцев. — М.: Наука, 1968. — 310 с.
5. Болотовский Б.М. Оливер Хевисайд /Б. Болотовский. — М.: Наука, 1985. — 259 с.
6. Лоренц Г. Теория электронов /Г. Лоренц. — М.: ГИИТЛ, 1953. — 470 с.
7. Клаузиус Р. Механическая теория тепла. — В кн.: Второе начало термодинамики. — М.—Л., 1934. — 311 с.
8. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика /Дж. Гиббс. — М.: Наука, 1982. — 580 с.
9. Больцман Л. Избранные труды /Л. Больцман. — М.: Наука, 1984. — 590 с.
10. Дирак П. Эволюция физической картины природы /Элементарные частицы / П. Дирак. — М.: Наука, 1965.— С. 123 — 139.
11. Основатели кинетической теории. —М.—Л., ОНТИ, 1937. — 221 с.
12. Жизнь науки. — М.:Наука, 1973. — С. 218—219.
13. Эйнштейн А. Собрание научных трудов /А. Эйнштейн. — М.: Наука, 1965—1967. — 4т.
14. Кляус Е.М., Франкфурт У.И. Макс Планк / Е. Кляус, У. Франкфурт. — М.: Наука, 1980 — 392 с.
15. Планк М. Избранные труды / М. Планк. —М.: Наука, 1975. — 790 с.
16. Пуанкаре А. Наука и метод / А. Пуанкаре // О науке. —М.: Наука, 1983. —С. 284—403.
17. Пуанкаре А. Новые методы небесной механики / А. Пуанкаре // Избранные труды: В 3 т. —М.: Наука, 1971. — Т. 1. — 772 с.; 1972. — Т. 2. — 998 с.
18. Ляпунов А.М. Избранные труды / А.М. Ляпунов. — М.: АН СССР, 1948. — 538 с.
19. Мандельштам Л.И. Вопросы электрических колебаний систем и радиотехники / Л.И.Мандельштам // Мандельштам Л.И. Полное собрание трудов / Л.И. Мандельштам. — М.: Изд. АН СССР, 1948.— Т. 3.— С. 52—86; те саме // УФН. — 1933. — 13, вып. 2. — С. 161—194.
20. Андронов А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, С.Э. Хайкин. — М.—Л.: ОНТИ, 1937. — 519 с.
21. Крилов М.М. Основні проблеми нелінійної механіки. Теорія і застосування в різних технічних і фізичних науках. Доповідь на січневій сесії ВУАН / М.М. Крылов, М.М. Боголюбов // Сб. оттисков 162, 173, 175, 189 — 1934. — 28 с.
22. Крылов Н.М. Новые методы нелинейной механики в их применении к изучению работы электронных генераторов / Н.М. Крылов, Н.Н. Боголюбов. — М.: ОНТИ ГТТИ, 1934. — 243 с.
23. Крылов М.М. Про деякі формальні розклади нелінійної механіки / М.М. Крилов, М.М.Боголюбов. — К.: ВУАН, 1934. — 89 с.
24. Крылов Н.М. Введение в нелинейную механику (Приближенные и асимптотические методы нелинейной механики) / Н.М. Крылов, Н.Н. Боголюбов //Зап. Каф. Математической физики АН УССР. — 1937. — Т. 1—2. — 364 с.
25. Боголюбов Н.Н. О некоторых статистических методах в математической физике / Н.Н. Боголюбов. — К.: Изд-во АН УССР, 1945. — 137 с.
26. Базаров И.П. Заблуждения и ошибки в термодинамике / И.П. Базаров. — М.:Едиториал, 2003. — 120 с.
27. Николис Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. — М.: Мир, 1990. — 344 с.
28. Гурков К.П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов / К.П. Гурков — М.: Наука, 1978. — 128 с.

29. *Зубарев Д.Н.* Неравновесная статистическая термодинамика /Д.Н.Зубарев. – М.: Наука, 1971. –416 с.
30. *Балеску Р.* Равновесная и неравновесная статистическая механика / Р. Балеску. – М.: Мир, 1978. – Т.1 – 404, Т. 2. – 398 с.
31. *Пригожин И.Р.* Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой / И. Р. Пригожин, И.Стенгерс ; пер. с англ. Ю. А. Данилова ; общ. ред. и послесл. В.И. Арпшнова и др. [Изд. 6-е]. – М. : URSS : Изд-во ЛКИ, 2008. – 294 с.
32. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: Пер. с англ./ Общ. ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича и Ю.В. Сачкова. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
33. *Хакен Г.* Синергетика. / Г. Хакен – М., 1980. – 406 с.
34. *Синергетике 30 лет.* Интервью с профессором Г. Хакеном. Проведено Е.Н. Князевой // Вопросы философии. 2000. № 3. – С. 53–61.
35. *Хакен Г.* Синергетика как мост между естественными и социальными науками / Г. Хакен // Синергетическая парадигма. Человек и общество в условиях нестабильности. – М.: Прогресс-традиция, 2003. – С.106–123.
36. *Пригожин И.* Неравновесная статистическая механика / И. Пригожин. – М.: Мир, 1964. – 314 с.
37. *Пригожин И.* Биологический порядок, структуры и неустойчивости /И. Пригожин, Ж.Николис //УФН. 1973. – Т. 109. – Вып. 3. – С. 517–544.
38. *Пригожин И.* От существующему к возникающему / И. Пригожин. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
39. *Zabusky N.J.* Interaction of solitons in a collisionless plasma and the recurrence of initial states / N.J.Zabusky, M.D. Kruskal // Phys. Rev. Lett. 1965. – V. 15. – P. 240–243.
40. *Данилов Ю.А.* Нелинейность / Ю.А. Данилов // Знание – сила. – 1982. – №11. – С.34.

Одержано 18.01.2014

Т.В. Килощицкая

Предпосылки возникновения и становления синергетики

Рассмотрены предпосылки возникновения и становления междисциплинарного направления в науке – синергетики (середина XIX в.—70-е гг. XX в.). Показан вклад И.Р.Пригожина в формирование синергетики, или общей теории самоорганизации открытых систем произвольной природы. Проанализированы труды Германа Хакена (дал определение понятию «синергетика», указал на сходство процессов самоорганизации в физических, химических, биологических объектах, предложил единый подход).