

2. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика / С. А. Ахманов, В. И. Емельянов, Н. А. Коротеев, В. Н. Семионов // УФН. – 1985. – Т. 147, вып. 4.
3. Макин В. С. Закономерности образования упорядоченных микро- и наноструктур в конденсированных средах при лазерном возбуждении мод поверхностных поляритонов. : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.05 / Макин В. С. – Санкт-Петербург, 2013.
4. Спевак И. С. Формирование поверхностных периодических структур излучением с круговой поляризацией / И. С. Спевак, А. В. Кац // Оптика и спектроскопия. – 1989. – Т. 67, вып. 8. – С. 1320–1323.
5. Medvid' A. Nano-cones Formed on a Surface of Semiconductors by Laser Radiation: Technology, Model and Properties / A. Medvid' // Nanowires Science and Technology / ed. Nicoletta Lupu. – Vukovar : Inech, 2010. – P. 61–82.
6. Surface electromagnetic waves in optics / A. M. Bonch-Bruевич, M. N. Libenson, V. S. Makin, V. V. Trubaev // Optical Engineering. – 1992. – Vol. 31, No 4. – P. 718–730.
7. Trokhimchuk P. P. Nonlinear and Relaxed Optical Processes / P. P. Trokhimchuk // Problems of interactions. – Lutsk : Vezha-Print, 2013. – 280 p.

**Березюк Геннадий. Зависимость ориентации поверхностных периодических структур от типа поляризации излучения.** В рамках релаксационной оптики дано объяснение обнаруженному набору поверхностных периодических структур, дополнительному к основному, на основе взаимной интерференции полей поверхностных поляритонов. Рассмотрены дополнительные периодические наноструктуры, возникающие при воздействии излучения различного типа поляризации.

**Ключевые слова:** релаксационная оптика, интерференция, наноструктуры, плазмон поляритоны, поляризация, решетка.

**Bereziuk Gennadii. The Dependence of Orientation of Surface Periodic Structures from the Type of Polarization.** New laser-induced surface nanostructures are analyzed as phenomena of Relaxed Optics. Additional nanostructures may be explained on the basis of concept of mutual interference fields of surface polaritons. Additional periodic nanostructures arising under the action of various types of radiation polarization are considered.

**Key words:** relaxed optics, interference, nanostructures, plasmon polaritons, polarization, grating.

Стаття надійшла до редколегії  
08.12.2014 р.

УДК 539.104:537.311:535.1

Петро Трохимчук

### Проблеми створення теорій відкритих систем

Обговорено проблему створення теорій відкритих систем. Проаналізовано термодинамічні та статистичні теорії. Із цього погляду розглянуто квантову механіку. Показано, що тенденції створення теорій відкритих систем пов'язані з проблемою створення синтетичних теорій. Зроблено висновок: поліметричний аналіз, як універсальна теорія оптимального синтезу знань, – водночас і найбільш загальна теорія відкритих систем.

**Ключові слова:** термодинаміка, відкриті системи, синтез, квантова механіка, поліметричний аналіз, ентропія, гібридна теорія систем.

**Постановка наукової проблеми та її значення.** Проблема створення теорії відкритих систем виникла із самого початку виникнення науки [9]. Тут доречно згадати вислів Архімеда «дайте мені точку опори, і я переверну весь світ» [9]. У науці, починаючи з Декарта [9] та Ньютона [8; 9] важливо вибрати оптимальну систему аналізу та синтезу знань, яка б найбільш адекватно описувала відповідні процеси та явища [9]. На зорі виникнення сучасної науки питання не ставилося про відкриті системи, там все було навпаки, як зробити замкнену систему, що могла б пояснити несуперечливо, скажімо, земну й небесну механіку чи електродинаміку [9]. У сучасній теоретичній фізиці елементи теорії відкритих систем є в термодинаміці (термостат) [4–6] та в борнівській (імовірнісній) інтерпретації квантової механіки (коефіцієнти розкладу функції стану по базису характеризують

«термостат», а сам базис – внутрішню систему) [10]. У сучасній науці виникла проблема щодо доречності застосовності тих чи тих теорій для пояснення нових явищ і процесів та проблема появи нових наук, які б ці явища описували. Зокрема, у ХХ ст. виникли науки синтетичного типу: кібернетика [7], теорія електрослабкої взаємодії, теорія великого об'єднання тощо [9]. З розвитком комп'ютерингу виникла проблема формалізації невербальних систем знань. Постала проблема формалізації лінгвістики, мистецтва тощо [9]. Отож **мета** статті – дещо ширший аналіз, ніж у фізиці, проблеми створення теорії відкритих систем.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.** У сучасній фізиці фізику відкритих систем розуміють як нерівноважну термодинаміку та її «мікророзширення» – статистичну теорію відкритих систем, а також синергетику [4–6; 9]. Основне завдання синергетики – виявлення загальних ідей, методів і закономірностей у процесах самоорганізації в різних сферах природознавства і соціології [9].

Виникнення теорії самоорганізації – синергетики – підготували роботи багатьох учених [9], серед яких Л. Больцман і А. Пуанкаре – основоположники, відповідно, статистичного й динамічного опису складних рухів; А. М. Ляпунов – один із творців теорії стійкості руху, що лежить в основі теорії самоорганізації; А. Н. Колмогоров, який визначив, зокрема, поняття метричної ентропії, яке відіграє істотну роль у теорії динамічних систем; Л. І. Мандельштам А. А. Андронов, Н. С. Крилов, Л. Д. Ландау, Я. Б. Зельдович та багато, багато інших. Особливо варто відзначити роль Володимира Івановича Вернадського [9].

Згідно з Г. Хакеном синергетика [9] – це теорія самоузгодженої дії. Хоча, на думку Ю. Л. Климонтовича, у синергетиці немає однозначної відповіді на запитання: що таке самоорганізація? [4–6]. У цьому, однак, і немає потреби. Потрібне інше – установлення критеріїв відносної міри впорядкованості, організованості різних нерівноважних станів відкритих систем. Без використання таких критеріїв неможливо відповісти на найосновніші питання, зокрема зафіксувати саму наявність процесу самоорганізації.

До основних належать і завдання виявлення взаємозв'язку динамічного і статистичного опису складних рухів у відкритих системах [4–6].

Суттєву роль відіграють поняття *хаос* та *порядок*. У фізиці поняття *хаос*, *хаотичний рух*, *порядок* фундаментальні, але недостатньо чітко визначені.

Справді, починаючи з класичних робіт Максвелла, Больцмана, Гіббса, хаотичним називають рух атомів у стані статистичної рівноваги [4–6; 9]. Хаотичним же називають і рухи в станах, далеких від рівноваги, наприклад у генераторах шуму, у турбулентних потоках тощо.

Значного поширення набув термін *динамічний хаос*. Він характеризує складні рухи в мало-розмірних («простих») нелінійних дисипативних динамічних системах. Класичним прикладом такої системи слугують рівняння Лоренца в теорії теплової конвекції [4–6]. Отож одним і тим самим терміном *хаос* характеризують найрізноманітніші види складних рухів. Це і вказує на потребу введення критеріїв відносної міри хаотичності або впорядкованості. До таких критеріїв належать: *K*-ентропія (ентропія Крилова–Колмогорова–Синая), показники Ляпунова, різним чином визначені розмірності фазового простору цього складного руху [4–6].

У літературі значну увагу приділено критеріям, які ґрунтуються на зіставленні перенормованих до заданого значення середньої ефективної енергії значень ентропії Больцмана–Гіббса–Шеннона [1; 3], а також на зіставленні значень виробництва ентропії стійких і нестійких станів відкритих систем [4–6].

Вибір параметрів управління в процесах самоорганізації проводиться, зазвичай, або на основі вже наявної інформації про систему, або на основі додаткових досліджень, наприклад біфуркаційних діаграм. При цьому можливі, природно, і помилки, тому критерій порівняльної міри впорядкованості повинен давати й можливість контролю правильності вибору. Параметрами управління можуть виступати найрізноманітніші характеристики. Наведемо декілька прикладів. У класичних і квантових генераторах це зворотний зв'язок або накачування, зовнішні сили. У мультистабільних системах вибір того або того стаціонарного стану може здійснюватися через зміну початкових умов. Параметром управління може слугувати й «повільний» час, наприклад час спостереження за станом здоров'я пацієнта. У гідродинаміці, залежно від природи течії рідини, роль параметрів управління мають числа Рейнольдса, Рейля, Тейлора [9]. За наявності декількох параметрів управління можливий пошук найбільш ефективних шляхів самоорганізації.

Розглянемо поняття *фізичний хаос* [4–6]. Позначимо через  $a = (a_1 \dots a_n)$  набір вибраних параметрів управління. Виділимо два стани при значеннях  $a = a_0$ ,  $a = a_0 - \Delta a$ . Процесу самоорганізації відповідають зміни  $\Delta a > 0$ . За цієї умови для процесу самоорганізації

$$a = a_0 + \Delta a, \quad \Delta a_i > 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Стан при  $a = a_0$  назовемо станом фізичного хаосу. Прийматимемо його за «початок відліку» при порівнянні міри впорядкованості. Слово *фізичний* введено для наголошення фізичного характеру цих критеріїв. Зазначимо, що стан фізичного хаосу може бутисуттєво нерівноважним.

Розглянемо співвідношення між еволюцією та самоорганізацією. Поняття *еволюція* динамічне, але має досить загальний характер. У фізиці розглядається, наприклад, еволюція до рівноважного стану, а у відкритих системах – еволюція до стаціонарних станів. Еволюцію можна розглядати як утворення послідовності нових структур. У біології згідно з Дарвіном утворення нових структур відбувається через природний відбір [4–6].

Яке ж співвідношення понять *еволюція* і *самоорганізація*? Кажучи про процеси самоорганізації, маємо на увазі процеси, під час яких (згідно з наведеними вище критеріями) виникають складніші й досконаліші структури. За такого підходу виникає запитання: чи є будь-який еволюційний процес є процесом самоорганізації? Відповідь, природно, негативна, оскільки ні у фізичних, ні навіть у біологічних системах не закладено «внутрішнє прагнення» до самоорганізації. Справді, еволюція може вести й до деградації [4–6]. У фізиці прикладом слугує перехід до рівноважного стану, який згідно з Больцманом і Гіббсом найбільш хаотичний. Деградація структур можлива, природно, і в біології, наприклад, під час мутацій. Отже, самоорганізація – лише один із можливих варіантів еволюції [4–6; 9].

Раніше проаналізуємо критерії еволюції і самоорганізації у фізичних системах.

Насамперед розглянемо *H*-теорему Больцмана й теорему Гіббса [3–6; 9]. У назві «*H*-теорема» літера *H* походить від англійського слова *Heat* – тепло. Цим наголошено, що йдеться про еволюцію ентропії в процесі встановлення теплової рівноваги. Доведення *H*-теорема ґрунтується на властивості інтегралу зіткнень Больцмана  $I_p : \int \phi(p) I_p dp \geq \phi$  при  $\phi = -k \ln f$  та за умови, що частинки газу не виходять за межі системи. Результат звичайно представляється у вигляді:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0, \quad (1)$$

де ентропія  $S(t) = -k \int f \ln f dr dp$ .

Знак рівності ставиться для рівноважного стану, коли  $f_0$  – розподіл Максвелла.

Надалі Ю. Климонтович пов'язує ентропію з функціоналом Ляпунова, тому для цього *H*-теорема формулюються дещо інакше [4–6]. Вона також впливає з (1), але з урахуванням дещо інших властивостей інтеграла зіткнень  $\int \phi(p) I_B dp = 0$  при  $\phi = 1, p, \frac{p^2}{2m}$ , та зводиться до твердження, що є функціонал Ляпунова  $S(t)$  із властивостями [4–6]:

$$\Lambda_s \equiv S_0 - S(t) = k \int \ln \frac{f}{f_0} \cdot f dr dp \geq 0, \quad \frac{d(S_0 - S)}{dt} \leq 0, \quad (2)$$

$$\langle H \rangle = \left\langle \frac{p^2}{2m} \right\rangle = \text{const.}$$

Звідси випливає, що рівноважний стан стійкий і відповідає максимуму ентропії  $S_0$ . У (2) спеціально відзначено, що в процесі еволюції до рівноважного стану середнє значення енергії розрідженого газу залишається незмінним. У цьому випадку це не додаткова умова, а властивість рівняння Больцмана. Однак саме із-за цього функціоналом Ляпунова є ентропія, а не яка-небудь інша характеристика системи.

Розглянемо тепер довільну систему з функцією Гамільтона  $H(x)$ . Рівноважний стан характеризується канонічним розподілом Гіббса:

$$f_0(x) = \exp \frac{F_0 - H(x)}{kT}, \quad \int f_0(x) dx = 1, \quad (3)$$

де  $F_0$  – потенціал Гельмгольца (вільна енергія).

Нехай  $f(x, t)$  – довільний розподіл із тим же нормуванням, але з одним обмеженням: середнє значення функції Гамільтона для розподілів  $f_0$  та  $f$  однакове, тобто:

$$\int Hf_0(x)dx = \int Hf(x, t)dx. \quad (4)$$

Через  $S_0, S$  позначимо ентропії, що відповідають розподілам  $f_0$  та  $f$ . Тоді відповідно до теореми Гіббса:

$$S_0 - S = k \int f \ln \frac{f}{f_0} dx \geq 0. \quad (5)$$

Отже, за умови сталості середньої енергії ентропія в стані рівноваги максимальна. Тут немає обмежень на взаємодію частинок системи. Щодо цього результат Гіббса більш загальний, ніж  $H$ -теорема [4–6]. Тут, однак, не розглядається питання про часову еволюцію функції  $S_0 - S(t)$  при релаксації до рівноважного стану.

Розглянемо тепер  $H$ -теорему в теорії броунівського руху. Наведемо найпростіший випадок, коли броунівські частинки розподілені в просторі однорідно. Тоді функція розподілу швидкостей при лінійному терті задовольняє рівнянню Фоккера–Планка [4–6]:

$$\frac{\partial f(\mathcal{G}, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 f(\mathcal{G}, t)}{\partial \mathcal{G}^2} + \frac{\partial(\gamma \mathcal{G} f)}{\partial \mathcal{G}}, \quad D = \gamma \frac{kT}{m}, \quad \int f d\mathcal{G} = 1. \quad (6)$$

Рівноважний розв'язок – розподіл Максвелла – запишемо у формі (3):

$$f_0 = \exp \frac{F_0 - H}{kT}, \quad H = \frac{m\mathcal{G}^2}{2}. \quad (7)$$

Для системи в термостаті можна визначити вільну енергію й для нерівноважного стану:

$$F(t) = U(t) - TS(t), \quad U(t) = \langle H \rangle, \quad S(t) = -k \int f \ln f d\mathcal{G}. \quad (8)$$

Різниця вільних енергій  $F(t) - F_0$  є функціоналом Ляпунова [4–6]. При цьому виконуються нерівності:

$$\Lambda_F = F(t) - F_0 = kT \int f \ln \frac{f}{f_0} d\mathcal{G} \geq 0, \quad \frac{d(F - F_0)}{dt} \leq 0. \quad (9)$$

У теорії марковських процесів функціонал Ляпунова  $\Lambda_F$  називають «ентропією Кульбака», у теорії управління – функціоналом Красовського [4–6].

Ми прийшли, отже, до результату, аналогічного до  $H$ -теореми Больцмана, з істотною відмінністю, що при броунівському русі роль функції Ляпунова відіграє вільна енергія нерівноважного стану [4–6]. Але вільна енергія, на відміну від ентропії, не може бути визначена для довільного нерівноважного стану й не має повний набір властивостей, потрібних для використання як міри невизначеності під час статистичного опису.

Роль функціонала Ляпунова при броунівському русі може відігравати й ентропія. Для цього, однак, потрібне перенормування розв'язку рівняння (1) до заданого значення середньої енергії  $\langle E \rangle = \left\langle \frac{m\mathcal{G}^2}{2} \right\rangle$  (порівняно з умовами (2), (4)). Якщо через  $\tilde{S}(t)$  позначити ентропію, зумовлену пере-

нормованим розподілом, то функціонал Ляпунова  $\Lambda_S = S_0 - \tilde{S}(t)$  задовольняє нерівностям (2). Для рівняння (6) результати можна представити в явному вигляді:

$$S_0 - \tilde{S}(t) = \frac{3}{2} k \ln \frac{T(t)}{T_0} \geq 0, \quad \frac{d(S_0 - \tilde{S}(t))}{dt} = -3k\gamma \frac{T(t) - T_0}{T_0} e^{-2\gamma t} \geq 0. \quad (10)$$

Співвідношення початкової  $T_0$ , біжучої  $T(t)$  та «кінцевої» (термостата)  $T$  температур отримуються з додаткової умови й має вигляд:

$$\frac{m \langle \mathcal{G} \rangle^2}{2} + \frac{3}{2} kT(t) = \frac{3}{2} kT, \quad T_0 \leq T(t) \leq T. \quad (11)$$

У теорії броунівського руху проведене перенормування можливе лише в обмеженій області початкових швидкостей, тому розглянутий приклад є, звичайно, ілюстративним. Він, однак, корисний, тому що показує принципову можливість використання ентропійного функціонала Ляпунова і для системи в термостаті. При формулюванні критеріїв відносного ступеня впорядкованості – критеріїв самоорганізації – така можливість є конструктивною.

Розглянемо складніший приклад броунівського руху у відкритій системі – генераторі Ван-дер-Поля. Функціонал Ляпунова й тут визначається різницею вільних енергій:

$$\Lambda_F = F(t) - F_0 = D \int f(E, t) \ln \frac{f(E, t)}{f_0} dE \geq 0, \quad \frac{d|F(t) - F_0|}{dt} \leq 0. \quad (12)$$

Покажемо, що  $H$ -теорему можна сформулювати й для ентропії. Знову зробимо перенормування, але тепер при заданому значенні функції  $H(E)$ :

$$\int H(E) \tilde{f}(E, t) dE = \int H(E) f_0(E) dE. \quad (13)$$

Із цього рівняння знаходимо перенормовану інтенсивність шуму  $\tilde{D}\{\tilde{f}\}$ . Вона функціонально залежить від розподілу  $\tilde{f}$ , що задовольняє нелінійному рівнянню Фоккера–Планка з коефіцієнтом дифузії  $\tilde{D}\{\tilde{f}\}$ . Функціонал Ляпунова визначається різницею ентропії  $S(t) - S_0$  та задовольняє нерівностям:

$$\tilde{\Lambda}_S = S_0 - \tilde{S}(t) = \int \tilde{f}(E, t) \ln \frac{\tilde{f}(E, t)}{f_0} dE \geq 0, \quad (14)$$

$$\frac{d(S_0 - \tilde{S}(t))}{dt} \leq 0, \quad \langle H(E) \rangle = \text{const.}$$

Отже, у процесі еволюції до стаціонарного стану з розподілом  $f_0(E)$  перенормована ентропія  $S(t)$  зростає і залишається незмінною при досягненні стаціонарного стану.

Відзначимо ще раз, що використання як функції Ляпунова ентропії дає певні переваги. По-перше, ентропія може бути виражена через функцію розподілу для довільного нерівноважного стану, для якого може бути визначена функція розподілу. По-друге, вільна енергія не має, на відміну від ентропії, властивостей, завдяки яким її можна було б прийняти за міру невизначеності, хаотичності.

Ріст ентропії (або зменшення вільної енергії) у відкритих системах при еволюції до стаціонарного стану виявляється можливим через те, що задані параметри  $a$ ,  $b$ ,  $D$  достатні для визначення лише стаціонарного стану, і, отже, можна вибирати початковий розподіл  $f(E, t = 0)$  [4–6].

Перейдемо тепер до однієї з основних проблем статистичної теорії відкритих систем – установленню критеріїв відносного ступеня впорядкованості нерівноважних станів у просторі параметрів управління [4–6]. Отже, вибираємо параметри управління. У число таких параметрів може бути включене й «повільний» час, що характеризує, наприклад, процес видужання. Для генератора Ван-Дер-Поля як параметра управління природно вибрати параметр зворотного зв'язку (накачування)  $a_n$  [4–6].

Будемо вважати зміни керуючих параметрів настільки повільними, що встигає встановлюватися стаціонарний стан у кожному проміжному стані, що характеризується, наприклад, для генератора розподілом  $f_0(E, a)$ . За цих умов і можна говорити про еволюцію стаціонарних станів у просторі параметрів управління [4–6].

Процедура побудови критеріїв така ж як і для задачі без параметрів управління. В усереднену функцію Гамільтона входить початкове значення параметра управління.

Основними критеріями тут є поряд зі співвідношенням типу (5) співвідношення

$$\frac{d\Lambda_S}{d\Delta a} \geq 0. \quad (15)$$

Якщо має місце нерівність (15), та знаки нерівностей типу (4) та (15) збігаються, то зміна  $\Delta a$  є управляючою. Причому ця зміна може бути як завгодно малою.

Отож відносно ступінь впорядкованості нерівноважних станів можна проводити по значеннях перенормованої ентропії. Цей критерій назвали  $S$ -теорема (від слова *Self-organization* – самоорганізація) [4–6]. Цим наголошено, що йдеться про критерій самоорганізації.

Треба відрізнити динамічний і статистичний опис відкритих систем. Виділимо два класи систем: динамічні й статистичні (стохастичні). Такий поділ не загальноприйнятий. Справді, наприклад, відома робота Я. Г. Синає [4–6] називається: «Стохастичність динамічних систем». Також широко використовують термін *хаотичні рухи детермінованих динамічних систем* і т. д.

В основу класифікації покладемо властивість *відтворюваності руху* за заданими початковими даними. Тоді за визначенням до *динамічного* ставляться *відтворені*, а до *стохастичних (статистичних)* – *невідтворені за початковими даними руху* в дисипативних системах.

При цьому відтворюваність розв'язку залежить від структури математичної моделі. Якщо рівняння не містять випадкових джерел, то процес відтворюваний і рух є динамічним, хоча він і може бути *непередбаченим* через його складність.

На фізику відкритих систем можна подивитись з погляду синергетики як розділу сучасної теорії управління – теорії автономних систем управління. Цей розділ фізики збагачує і сучасну теорію управління. Поряд із функціоналами Лагранжа, Гамільтона, Якобі, Іто, Вінера розвиваються функціонали Ляпунова [12]. Розділ синергетики (градієнтні системи) – це теорія катастроф, яка дає доволі просто описати критичні явища [12]. Але сучасна теорія управління давно вже вийшла за межі фізики й використовується для розв'язування найрізноманітніших завдання у різних галузях науки, культури й техніки.

### Поліметричний підхід як універсальна теорія відкритих систем

Надалі перейдемо до співвідношення де Бройля:

$$\frac{S_e}{k_B} = \frac{S_a}{\hbar}, \quad (16)$$

яке було отримане з аналізу термодинаміки точки [1], міра неупорядкованої фізичної інформації (число квантів) рівна мірі впорядкованої інформації (тут  $S_a$  – дія,  $\hbar$  – стала Планка,  $S_e$  – ентропія,  $k_B$  – стала Больцмана). Завдяки (16) співвідношенню про зростання ентропії для нерівноважних процесів (відкритих систем) може бути перенесено й на дію, тобто, інакше кажучи, фізика відкритих систем може бути побудована й для функціоналу дії. Тоді цей принцип буде виглядати так:

$$dS_a \geq 0. \quad (17)$$

У цьому випадку маємо для знаку рівності, грубо кажучи, принцип найменшої дії, для випадку знаку більше – фізику відкритих систем.

Співвідношення (16) може слугувати й обґрунтуванням переходу до поліметричного аналізу [9]. Рівність безрозмірної дії та безрозмірної ентропії дає змогу перейти до квантів впорядкованої або ж неупорядкованої інформації, тобто до обчислень [9]. Саме тому до питання створення теорій відкритих систем можна підійти із системно-обчислювального погляду [7; 9]. Саме проблема складності-простоти в кібернетиці згідно з С. Біром була проблемою ХХ ст. [2]. Як варіант розв'язання цієї проблеми є поліметричний аналіз [9] – універсальна система аналізу, синтезу та формалізації знань. Спрощена схема цього методу наведена на рис. 1 [9].

В основу поліметрії покладена ідея потрійної оптимізації: методологічної, математичної, частково наукової.

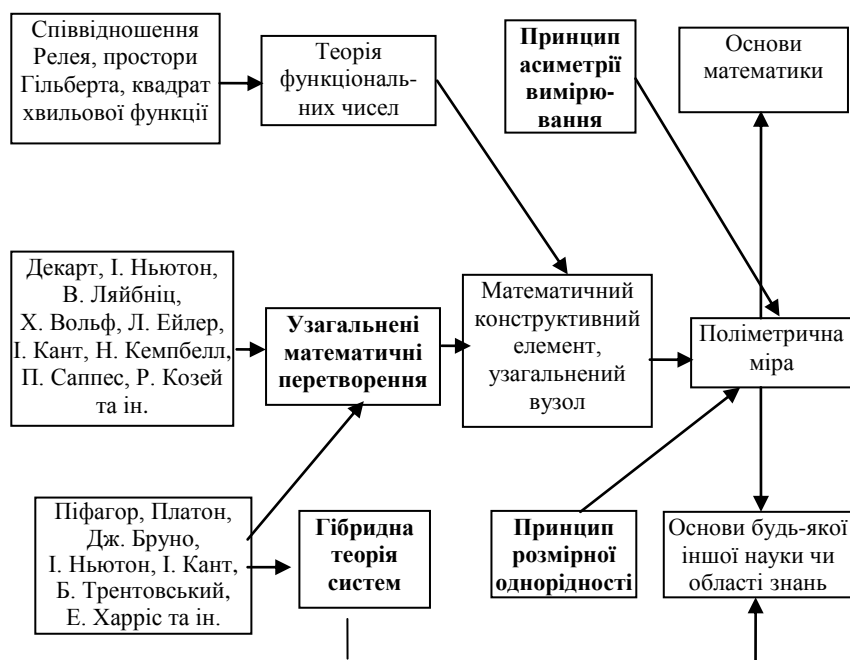


Рис. 1. Місце поліметричної методології в сучасній науці [12]

Основний конструктивний елемент поліметричного аналізу – узагальнений конструктивний елемент, що складається з функціональних чисел (узагальнені квадратичні форми) та узагальнених математичних перетворень, яких є 15 типів. Множина цих елементів утворює інформаційну решітку, а правила роботи з нею задає теорія інформаційних обчислень. Узагальнений конструктивний елемент є одночасно і елементом поліметричної (змінної) міри. Тут оптимально формалізована концепція Кемпбелла про первинні й вторинні вимірювання (кількісні та якісні узагальнені математичні перетворення) [9]. Для розширення сфери формалізації знань (включення до розгляду наук, які далекі від класичної математики) було введено параметр зв'язності, що відповідає числу зв'язків між двома вузлами інформаційної решітки. Для класифікації обчислень, залежно від їх складності, побудована гібридна теорія систем. В основу цієї теорії покладені критерій взаємності (критерій компоновки математичного конструтиву) та критерій простоти (критерій оптимальності цієї компоновки). У критерій простоти складовим елементом уходить принцип оптимальної інформаційної зчисленності (основний принцип теорії інформаційних обчислень). Згідно з гібридною теорією систем існує лише 10 мінімальних типів систем, а з урахуванням кількості типів узагальнених математичних перетворень – лише 150 типів систем формалізації знань. Причому чотири з десяти не мають жодного стосунку до математики. Параметрами розімкненості є кількість математичних перетворень і параметр зв'язності. Отже, у поліметричному методі число типів систем скінченне, тоді як число самих систем може бути як завгодно великим.

Поліметричний метод можна розглядати як варіант формалізації поліфазної наукової методології Еррола Е. Гарріса [9], а також як відповідь на фразу Архімеда *де знайти точку опори* [9]. Ця «точка» опори може бути пов'язана не лише з антропоцентризмом, а з будь-яким явищем чи теорією або моделлю. Проблема відкритості в цьому разі полягає в тому, що в поліметричному методі є параметри, які завжди дають змогу розширити цю систему чи теорію, або ж, у разі потреби, створити нову.

Поліметричний аналіз є також і системним варіантом створення теорій всього [9], а ці теорії мають бути відкритими: людина через свої обмежені можливості й у просторі, і в часі не може досягнути всі тонкощі свого буття.

**Висновки.** Отже, у цій роботі:

- проведено системний аналіз теорій відкритих систем;
- проаналізовано «термодинамічну» фізику відкритих систем Ю. Л. Климонтовича;
- показано, що завдяки співвідношенню де Бройля можна побудувати й «детерміновану» фізику відкритих систем;
- проаналізовано поліметричний аналіз і показано, що його можна розглядати як найбільш загальну теорію відкритих систем.

#### *Джерела та література*

1. Андрадэ э Силва Ж. Л. Поля, частицы, кванты / Ж. Л. Андрадэ э Силва, Ж. Лошак. – М. : Наука, 1972. – 190 с.
2. Бир С. Мы и сложность современного мира / С. Бир // Кибернетика сегодня: проблемы и суждения. – М. : Знание, 1976. – С. 18–32.
3. Бриллюэн Л. Наука и теория информации / Л. Бриллюэн. – М. : ГИФМЛ, 1960. – 392 с.
4. Климонтович Ю. Л. Введение в физику открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М. : Янус-К, 2002. – 284 с.
5. Климонтович Ю. Л. Проблемы статистической теории открытых систем: критерий относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации / Ю. Л. Климонтович // Успехи физических наук. – 1989. – Т. 158, вып. 1. – С. 59–91.
6. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 3 : Физика квантовых открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М. : Янус-К, 2001. – 508 с.
7. Кухтенко А. И. Кибернетика и фундаментальные законы / А. И. Кухтенко. – Киев : Наук. думка, 1987. – 144 с.
8. Ньютон И. Математические начала натуральной философии / И. Ньютон. – М. : Наука, 1989. – 690 с.
9. Трохимчук П. П. Математичні основи знань. Поліметричний підхід / П. П. Трохимчук. – Луцьк : Вежа-Друк, 2014. – 624 с.
10. Хуанг К. Статистическая механика / К. Хуанг. – М. : Мир, 1966. – 521 с.

**Трохимчук Петр. Проблема построения теорий открытых систем.** Проанализированы термодинамическая и статистическая теории в интерпретациях И. Пригожина и Ю. Климонтовича. С этой точки зрения рассматривается квантовая механика. Показано, что тенденции создания теорий открытых систем связаны с проблемой создания синтетических теорий. Было показано, что синергетика может быть представлена в виде возможного кандидата теории открытых систем. Сделан вывод, что полиметрический анализ как универсаль-

ная теория оптимального синтеза знаний в то же время может быть представлена как наиболее общая теория открытых систем.

**Ключевые слова:** термодинамика, открытые системы, синтез, квантовая механика, полиметрический анализ, энтропия, гибридная теория систем.

**Trokhimchuck Petro. The Problem of Open Systems Theories Creation.** The thermodynamic and statistical theory in the interpretations by I. Prigozhin and Yu. Klimontovich are analyzed. Quantum mechanics is considered from this point of view. It is shown that trends of open systems theories creation are related to the problem of creating of synthetic theories. For this case synergetics may be represented as one of candidates of the theory of open systems. It is concluded that polymetric analysis as a universal theory of optimal synthesis of knowledge at the same time may be represented as the most general theory of open systems.

**Key words:** thermodynamics, open systems, synthesis, quantum mechanics, polymetric analysis, entropy, hybrid theory of systems.

Стаття надійшла до редколегії  
11.12.2014 р.

УДК 539.104

**Петро Трохимчук  
Михайло Пеньковський  
Геннадій Березюк**

### **Проблеми моделювання дифузійних процесів у релаксаційній оптиці**

Обговорено основні проблеми моделювання дифузійних процесів релаксаційної оптики. Запропоновано модель фотостимульованої дифузії. Проаналізовано моделі дифузійних процесів у гомогенному й гетерогенному середовищах. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних даних.

**Ключові слова:** дифузія, фотостимульована дифузія, релаксаційна оптика, фазони, гетерогенні системи.

**Постановка наукової проблеми та її значення.** Проблема опису й моделювання дифузійних процесів релаксаційної оптики надзвичайно важлива для розуміння процесів, які проходять при незворотній взаємодії оптичного випромінювання з речовиною. Дифузійні моделі були використані для пояснення форми профілів розподілу донорних центрів в антимоніді й арсеніді індію. Було створено феноменологічну однодифузійну модель, яка ґрунтувалася на адаптованих рівняннях фото-ефекту; та напівфеноменологічну дводифузійну модель, яка ґрунтувалася на різних коефіцієнтах самодифузії та фотостимульованої дифузії компонент бінарних напівпровідників.

Однак для більш адекватного опису процесів дифузії та фотостимульованої дифузії під час релаксаційнооптичних процесів у таких напівпровідниках, як кремній і германій, дводифузійна модель в атомарному наближенні не може бути використана. Тут потрібно шукати підходи, які пов'язані зі структурними фазовими трансформаціями, що виникають при лазерному опроміненні. Зокрема, потрібно акцентувати увагу на таких аспектах, як внутрікластерна та кластерна дифузія, дифузійне фазоутворення тощо.

Отож **мета** статті – дослідити проблему опису та моделювання дифузійних процесів релаксаційної оптики в ширшому аспекті.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.** Згідно з класифікацією релаксаційнооптичних процесів і явищ дифузійні процеси належать до вторинних динамічних (колективних) процесів. У випадку релаксаційної оптики дифузію треба розглядати в комплексі з процесами перевипромінювання, оскільки обидва ці процеси пов'язані з переносом і перерозподілом енергії взаємодії [1–12].

При структурному підході маємо враховувати такі типи дифузії: фотостимульована дифузія «свелінгового» типу, пов'язана з надлишком фотоіндукованого від'ємного заряду в приповерхневій області поглинання випромінювання, у зв'язку із цим відбувається перерозподіл і хімічних компонент напівпровідника, і зміна його структури по глибині опроміненого матеріалу за рахунок фотоіонізаційних, включаючи плазмові, процеси; релаксаційна дифузія, пов'язана з тепловою релаксацією новоутворених структур та їх перехід у більш стабільний стан [11; 12].

---

© Трохимчук П., Пеньковський М., Березюк Г., 2014