

С учетом того что углы поворота сателлитов I ступени для всех модификаций редуктора будут одинаковы.

Из анализа углов поворота вала-шестерни для всех трех модификаций редуктора получаем неравенство

$$\bar{\gamma}_{13} \ll \bar{\gamma}_{12} \ll \bar{\gamma}_{11}. \quad (7)$$

На основании проведенного анализа трех модификаций редуктора следует, что редуктор II модификации будет иметь габариты серийного редуктора, обладать большей «жесткостью» и надежностью и поэтому промышленное использование таких редукторов является более предпочтительным при комплектации двухкамерных мельниц, как для измельчения цементного клинкера, так и железорудного сырья.

#### Список литературы

1. К. G. Eriksson, G. Marielund, A. Л. Гребенщиков, В. Ю. Фищев. Развитие системы мельничных футеровок. Горная промышленность. N1, 2003, с. 24-30, Россия, Москва изд-во МГТУ.
2. Малиновский Ю. А., Малиновская С. И., Малиновская Е. Ю. Модернизация приводных механизмов трубных мельниц при их использовании для измельчения рудных материалов. Гірничий вісник 95(1), Кривий Ріг 2012, с. 158-161.
3. Малиновский Ю. А., Малиновская С. И., Малиновская А. Ю., Бондарец А. А. Некоторые особенности выбора параметров и расчета устройств для снижения уровня динамических нагрузок в приводах измельчительных машин. Разработка рудных месторождений. Выпуск 93, Кривой Рог, 2010, с. 116-119.
4. Малиновский Ю. А., Малиновская С. И., Бондарец А. А. Особенности выбора параметров и расчета упругих муфт в приводах крупных мельниц для измельчения железного сырья. В сб. научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2009. Т. 1 Технические науки. Одесса 2009, с. 34-39.
5. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник 3 изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979, 702с.

Рукопись поступила в редакцию 17.01.14

УДК 531.53 (076.5)

С.В. ПОВАР, канд. пед. наук, доц., Криворізький національний університет

### ЭНТРОПИЯ, ХАОС І ПОРЯДОК (СУЧАСНЕ РОЗУМІННЯ)

Запропоновано інтегративний підхід до висвітлення понять *ентропія, хаос і порядок* - з точки зору термодинаміки, теорії ймовірностей і матстатистики, МКТ, синергетики. Надано зведену таблицю формул, графіків і схем теплових процесів.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** «Наука - це ясне пізнання істини, просвітлення розуму, ... всюди вірний і нерозлучний супутник» - стверджував М.В. Ломоносов. Концепції природничих наук протягом останніх десятиліть постійно оновлюються (сьогодні це дуже відчутно). Світоглядні горизонти розширюються. Університетська освіта цьому сприяє. У випускника формується здатність до самоосвіти, підвищується рівень логічного і творчого мислення. Сприяття цьому покликане, зокрема, *навчально-методичне забезпечення* - підручники, навчальні посібники, методичні розробки. Але тут, на жаль, є проблема - спостерігається тенденція їх *відставання* (особливо це стосується підручників).

Відшукування шляхів вирішення цієї проблеми входить до обов'язків викладача. Власна педагогічна практика та аналіз підручників і посібників з курсу фізики показують, що найслабшим місцем є введення поняття ентропії: зовсім слабо висвітлені її зв'язки з формулою Больцмана, з теорією ймовірностей; зовсім не показано зв'язків із синергетикою, з порядком і хаосом у їх сучасному розумінні.

З метою інформаційної допомоги студентам у висвітленні даного питання пропонуємо інтегративний підхід.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Як відомо, в кінці ХХ століття закінчено розробку основ *лінійної теорії* нерівноважних процесів, що завершилася створенням *лінійної нерівноважної термодинаміки*. Створюється *лінійна феноменологічна* (пізнання явищ, а не сутностей речей) *теорія* нерівноважних процесів.

Як підсумок розвитку нерівноважної термодинаміки з'явилась абсолютно нова дисципліна - *синергетика* – наука про самоорганізацію і стійкість різних складних нерівноважних систем: фізичних, хімічних, біологічних, соціальних. Це наука про закони народження порядку із хаосу.

Звідси такі характерні для постнекласичного етапу розвитку науки новації, як:

упровадження ідеї саморозвитку;

наголос на необхідності глобального всебічного погляду на світ («парадигма цілісності»);

широке використання понять: хаос і порядок, нелінійність, невизначеність, ймовірність, ентропія, флуктуації, дисипативні структури;

упровадження ідей і методів синергетики у всі частинні науки.

Назву «синергетика» ввів Хакен Г. (від грецького «синергос» - діючий разом).

Ключові ідеї синергетики:

**порядок** виникає із **хаосу**; **хаос** може бути в якості створюючого начала, конструктивного механізму еволюції;

**нелінійність** розвитку **складноорганізованих систем** (існує декілька альтернативних шляхів розвитку);

в особливих станах соціального середовища дії однієї людини можуть впливати на макросоціальні процеси;

майбутній стан системи як би формує, змінює її наявний стан.

Синергетика розвивається. Висвітлення питань нерівноважної термодинаміки і синергетики є у нових навчальних посібниках, підручниках, на сторінках періодичних видань та в мережі інтернет.

Розробники нетрадиційної нової концепції самоорганізації - вчені А.М. Саботинський, Б.І. Белоусов, а також їх послідовники - бельгійська школа на чолі з Іллею Пригожином, лауреатом Нобелівської премії (1977 - саме за розробку теорії дисипативних структур).

„Порядок із хаосу” - назва книги І.Р. Пригожина у співавторстві з істориком науки І. Стенгерс. Ця назва характеризує суть досліджень, розпочатих цим видатним ученим у 50-ті роки ХХ ст., які завершилися створенням нерівноважної термодинаміки.

З легкої руки Пригожина було дано нове розуміння «порядку» і «хаосу», показано, що є багато можливих ходів руху Космосу, біосфери та історії.

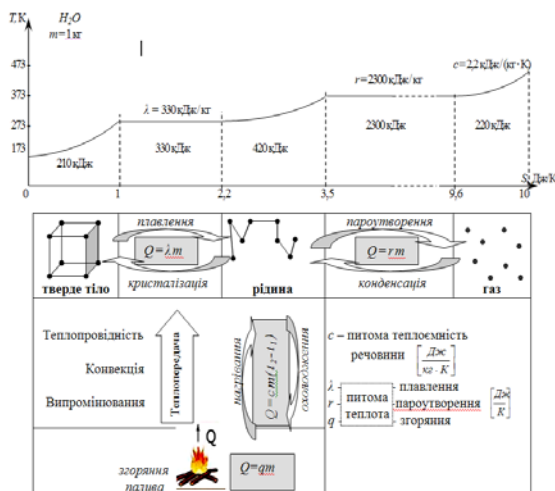
**Постановка завдання.** Поняття ентропії - важке для розуміння і сприйняття. Першокурсником воно може бути сприйняте тільки за умов розвинутого дискурсивного мислення (опосередкованого) знання основ термодинаміки, МКТ, теорії ймовірностей, матстатистики.

Мета статті - показати авторське бачення підходу до вивчення понять ентропія, хаос і порядок.

**Викладення матеріалу та результати.** *Ентропія* - функція стану термодинамічної системи.

Щоб певним чином унаочнити зв'язок ентропії з відомими поняттями термодинамічної температури  $T$  та кількості теплоти  $Q$ , розглянемо приклад *теплого процесу*.

У посудині є кусок льоду, посудину нагрівають. Лід нагрівається і плавиться. Утворена вода нагрівається, закипає і випаровується (рис. 1).



**Рис. 1.** Зведена таблиця формул і графіків процесу нагрівання  $H_2O$  в різних станах

Формула речовини  $H_2O$  незмінна у всіх станах речовини. Це прояв *симетрії*. При такій послідовності змін станів речовини (від льоду до пари) зростає хаос: місце знаходження молекули все важче визначити. Міра хаотичності руху молекул речовини - це ентропія  $S$ .

Пропонується розглянути графік всіх цих процесів у системі  $OST$ .  $OS$  - це термодинамічна координатна вісь. Площа під кривою  $T(S)$  на кожній ділянці графіка відповідає значенню одержаної відповідної кількості теплоти.

Маємо

$$\Delta S = \Delta Q/T. \quad (1)$$

Зміна ентропії при елементарній зміні стану ізолюваної термодинамічної системи

$$dS = \delta Q/T. \quad (2)$$

При нагріванні системи ( $\delta Q > 0$ ) її ентропія зростає.

Графік дає можливість порівняти ентропію, скажімо, процесу плавлення льоду і процесу кипіння води (для  $m=1$  кг) - їх відношення 1:5.

Пригадаємо *ізотермічне розширення газу* (рис. 2).

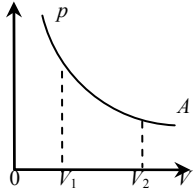


Рис. 2. Ізотерма ідеального газу

За рахунок наданої кількості теплоти  $\Delta Q$  виконується робота  $A$

$$\Delta Q = A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Отже,  $\Delta Q = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ , звідки з урахуванням формули (1) маємо

$$\Delta S = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (3)$$

Розглянемо приклад обчислення ентропії в *теорії ймовірностей*.

Уявимо собі посудину, розділену перегородкою на дві рівні частини (камери). Нехай у першій частині знаходиться газ, у другій частині пустота. Якщо перегородку прибрати, то молекули газу можуть негайно перейти в другу частину і розподілитися рівномірно по всій посудині.

Тепер припустимо, що газ складається тільки з чотирьох молекул ( $N=4$ ). Тоді можливі  $W=16$  розміщень молекул у двох половинах посудини ( $2^4=16$ ).

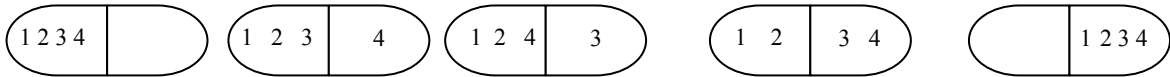


Рис. 3. Варіанти розміщення молекул у двох камерах

У другій половині посудини може бути 0,1,2,3,4 молекули (це дискретна випадкова величина, яку позначимо  $X$  із значеннями  $x_i$ ) з відповідними ймовірностями

$$p_i = \omega_s / 16,$$

де  $\omega_s$  - частота значення  $x_i$ .

Це можна представити таблицею розподілу

$x_i$	0	1	2	3	4
$p_i$	1/16	4/16	6/16	4/16	1/16

У теорії ймовірностей ентропія розподілу дискретної випадкової величини визначається формулою це міра ступеня невизначеності розподілу дискретної випадкової величини (міра хаосу)

$$H(X) = -\sum_i p_i \log p_i \quad (4)$$

Для наочності побудуємо полігон ймовірностей.

Тут середнє значення  $\bar{X} = 2$ . (Формула для обчислення:  $\bar{X} = x_1 p_1 + \dots + x_4 p_4$ ).

Якщо деякі з молекул перемістилися у другу половину посудини, то це означає, що газ розширився. Може статися, що випадково всі 4 молекули попадуть в одну частину посудини.

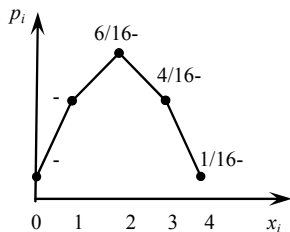


Рис. 4. Полігон ймовірностей

Такого роду відхилення від середніх значень (значні відхилення), які існують у малих масштабах (об'ємах), носять назву **флуктуацій**.

У даному прикладі стандартна флуктуація  $\sigma = 1$  (Формула для обчислення:  $\sigma = \sqrt{X^2 - \bar{X}^2}$ ). Майже всі значення  $X$  знаходяться у проміжку  $X = \bar{X} \pm \sigma$ , тобто від 1 до 3.

Зауважимо, що в  $V=1\text{см}^3$  повітря є  $N=3 \cdot 10^{19}$  молекул (за нормальних умов), а при зверхвисокому вакуумі - порядку  $10^5$  молекул. Число можливих розміщень  $2^N$  буде дуже великим, і самостиснення газу в одну половину камери може трапитись на надто довгому відрізку часу. Тобто самостиснення - *занадто мало ймовірний* процес. Це *необоротний* процес.

Розглянутий метод - це по суті статистичний метод. Тепер розглянемо *статистико-механічне* розуміння ентропії, яке обґрунтував Л. Больцман для *рівноважних термодинамічних систем*.

Як відомо, *рівноважна термодинамічна система* - це система, у всіх областях якої швидко встановлюється певна температура і довгий час не змінюється.

У таких системах можуть відбуватися лише процеси *деструктивного* характеру, що супроводяться поступовим зростанням *ентропії*.

Необоротний характер процесів пов'язаний з переходом від станів менш ймовірних до станів більш ймовірних. Людвіг Больцман показав, що ентропія  $S$  пропорційна логарифму ймовірності даного стану

$$S = k \cdot \ln W, \quad (5)$$

де  $W$  - термодинамічна ймовірність даного стану, це число можливих розподілів елементів системи за координатами і швидкостями, тобто це кількість мікростанів, які неперервно змінюють один одного і є мірою неупорядкованості макросвіту.

Очевидною є пропорційність між  $W$  і  $V^N$ :

$$W \sim V^N, \text{ де } N - \text{кількість молекул у даному об'ємі } V.$$

Тоді матимемо

$$\frac{W_2}{W_1} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^N \quad (6)$$

Оскільки зміна ентропії  $\Delta S = S_2 - S_1 = k(\ln W_2 - \ln W_1) = k \ln \frac{W_2}{W_1}$ , то, враховуючи формулу (6),

матимемо  $\Delta S = k \ln(V_2/V_1)^N = kN \ln(V_2/V_1) = \nu R \ln(V_2/V_1)$ .

Прийшли до формули (3) і цим підтвердили рівноправність енергетичного та статистичного підходів до визначення ентропії.

Ентропія системи слугує мірою «обезцінення» її енергії.

Тоді маємо, що друге начало термодинаміки стверджує неможливість зменшення ентропії в ізольованій системі, тобто, що в ізольованій системі  $\Delta S \geq 0$ .

Класична термодинаміка, яку Людвіг Больцман намагався обґрунтувати за допомогою класичної механіки, описує тільки поведінку *строго ізольованих систем*, близьких до *стану термодинамічної рівноваги*, і які відхиляються від неї *лише в межах чисто статистичних флуктуацій*.

Зауважимо, що в теорії інформації ентропія є мірою невизначеності ситуації.

Але реально існуючі системи не є рівноважними - в окремих їх частинах завдяки флуктуаціям можуть самодовільно з'являтися процеси *самоорганізації*, самовиникнення із хаосу нерівноважних, так званих *дисипативних* структур, які живляться вільною енергією зовнішнього середовища. Приклади таких процесів - перлисті хмари в небі, самозародження життя на Землі та біологічна еволюція.

Але ж у *впорядкованих* системах ентропія менша. Чи це не є порушенням другого начала термодинаміки? Гостра дискусія на цю тему продовжувалась декілька років і, в кінці кінців, завершилась перемогою прибічників строгого виконання *фундаментальних* законів природи.

Але при цьому було зроблено ряд уточнень змісту використовуваних слів. Наприклад, ревізії підлягав смисл поняття «хаос» і поняття «система».

*Хаос у рівноважних системах* носить суто *статистичний* характер, і ми говоримо лише про ймовірність відхилення системи від стану рівноваги. Реакція такої системи на ту чи іншу збурюючу дію є *лінійною* (вона *прямо пропорційна* збурюючій силі і намагається повернути систему в попередній стан). Так, якщо по гладенькій трубці тече рідина з *невеликою* швидкістю, то в ній випадково виникають малі завихрення. Але вони самі по собі гасяться, і в цілому потік залишається упорядкованим, ламінарним.

Але якщо система *сильно нерівноважна*, тобто має значний надлишок вільної енергії, то в ній може виникнути хаос особливого виду - *динамічний*. Реакція такої системи на збурюючу дію *нелінійна* і може бути як завгодно великою при дуже малому первинному збуренні. Так, якщо швидкість руху рідини по трубці перевищує деяку критичну величину, то найменша неоднорідність цього потоку відразу приведе до катастрофічного перетворення ламінарного потоку в неупорядкований, *турбулентний*.

Однак динамічний хаос визначний тим, що, по-перше, за непередбачуваною поведінкою системи криється строгий *детермінізм* (визначеність) - всі процеси в системі можна математично *розрахувати* з високою точністю. По-друге, особливість такого хаоса, як уже згадувалось, полягає в тому, що він може слугувати джерелом *самозародження* строго упорядкованих структур. Наприклад, у турбулентному потоці можуть виникати *стійкі* вихрі - подібні вихрі можна спостерігати за човном, який швидко пливе. Закономірність виникла із хаоса. Це результат самоорганізації матерії. Отже, хаос за певних умов може породити порядок.

Оскільки для хаотичних систем вводиться *ймовірнісний* опис, з'являється поняття *малоймовірності оборотності процесу*. Виходить, що хаос вводить *стрілу часу!* І ймовірність стає вираженням хаосу. Тепер всі системи, які допускають необоротний ймовірнісний опис, вважаються хаотичними. Тобто Ілля Пригожин перевів *хаос* у позитивний засіб дослідження процесів.

Як бачимо, синергетика - це стежина між безжиттєвими (ньютонівськими) законами і вируючими подіями. Тепер відкриваються нові горизонти і нові нерозв'язані питання.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Наведений огляд стану фізичної науки та її відображення в навчальних посібниках вказує на необхідність поглибленого розгляду окремих понять курсу фізики.

Автором запропоновано інтегративний підхід до вивчення понять ентропія, хаос і порядок, що полягає у наступних кроках:

для розуміння і сприйняття першокурсниками вказаних понять пропонується повторення відповідного матеріалу, що вивчався у середній школі (зокрема через зінтегровану автором таблицю теплових процесів);

з огляду на значущість поняття ентропії в різних науках, його розглянуто в різних аспектах: термодинамічному і статистико-механічному, а також показано зв'язок між ними;

підкреслено узгодженість II начала термодинаміки і високої організованості навколишнього світу (за умови уточнення смислу понять хаос, система та ін.).

Матеріал статті доцільно розмножити і адресувати студентам як додаткову інформацію до вивчення термодинаміки, МКТ та інших теорій.

#### *Список літератури*

1. **Повар С.В.** Узагальнюючі таблиці з фізики як засіб формування продуктивного стилю мислення студента // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: зб.наук. праць. Вип. УШ, т.2 – Кривий Ріг: Вид. Відділ НМетАУ, 2010. – С. 275-279.
2. **Пригожин И., Стенгерс И.** Порядок из хаоса / Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1986.- 431 с.
3. **Пригожин И., Стенгерс И.** Время, хаос и квант: К решению парадокса времени.-М.: Прогресс, 1994.-265 с.
4. **Хокинг С.** От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени.-М.: Мир, 1990.- 166 с.
5. **Яворский Б.М., Детлаф А.А.** Справочник по физике: 3-е изд.- М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1990. – 624 с.
6. **Самин Д.К.** 100 великих научных открытий. – М.: Вече. 2002, - 480с.
7. **Хакен Г.** Синергетика / Пер. с нем. – М.: Мир, 1980.
8. **Кучерук І.М., Горбатюк І.Т., Луцик П.П.** Загальний курс фізики: Навч.посібник для студентів вищих техн. і пед. закладів освіти. – К.: Техніка, 1999. – 536 с.
9. **Тарасов Л.В.** Современная физика в средней школе. – М.: Просвещение, 1990. – 288 с.
10. **Осипов А.И.** Термодинамика вчера, сегодня, завтра. Часть 1. Равновесная термодинамика / Соросовский Образовательный Журнал. 1999. №4. – С. 79-85.

Рукопис подано до редакції 17.02.14

УДК 621.86.067.2.5-83

Д.В. БАТРАКОВ, асистент, Ю.Г. ГОРБАЧОВ, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОМАСНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ТРАНСПОРТУЮЧОЇ МАШИНИ З ІНЕРЦІЙНИМ ПРИВОДОМ**

Наведено математичний опис та проведене математичне моделювання динаміки одномасної вібраційної транспортуючої машини з інерційним дебалансним приводом та направленим рухом коливань робочого органу. Проведений аналіз отриманих характеристик при зазначених вихідних динамічних параметрах. Отримані характеристики та залежності можуть використовуватись при оцінці можливості регулювання параметрів амплітуди і частоти