

Енергія взаємодії орієнтації різнойменними зарядами один до одного, негативна, протилежній орієнтації – позитивна.

Моменти сил, що діють на диполі в полі один одного, прагнуть розгорнути їх протилежними зарядами один до одного. Взаємна енергія такої орієнтації диполів негативна і між ними діють сили взаємного тяжіння.

В результаті дії моментів сил, з вірогідністю одиниця між вільними взаємодіючими диполями реалізується взаємне тяжіння.

При взаємному розташуванні диполів, що відповідає рівності нулю моментів сил що діють на диполі, косинуси кутів дорівнюють  $\pm 1$ , функція, взаємного розташування і орієнтації диполів,  $f(\theta_1, \theta_2, \gamma) = (2\cos\gamma - 6\cos\theta_1\cos\theta_2)$  може приймати одно з чотирьох значень  $-4, -8, +4, +8$ .

Позитивні значення енергії відповідають силам відштовхування між диполями. Негативна енергія взаємодії може сприяти зв'язаному стану диполів. Таким чином, в залежності від взаємного розташування і орієнтації диполів в зв'язаному стані, енергія зв'язку диполів може набувати два значення

$$W_1 = -4W(r), W_2 = -8W(r). \quad (15)$$

#### Список використаних джерел:

1. Джексон Дж. Класична електродинаміка, М. Світ 1965.
2. Ландау Л. Д., Ліфшиц Е. М. Теорія поля, М. «Наука» 1967.

**Степанець Ю.А.**

*молодший науковий співробітник;*

**Попенко В.Й.**

*старший науковий співробітник,*

*Науково-виробнича корпорація «Київський інститут автоматики»*

### ВЗАЄМОДІЯ МАГНІТНИХ ДИПОЛІВ

Особливості взаємодії електричних диполів [1] властиві і магнітним диполям. Спостерігати їх зручно на взаємодії двох однакових циліндричних магнітів, підвішених горизонтально на довгих нитках за точки центру тяжіння.

На великих відстанях взаємодія практично не помітна. При поступовому зближенні, під дією моментів сил відбувається їх взаємна орієнтація протилежними полюсами один до одного.

При подальшому зближенні починає позначатися взаємне тяжіння магнітів, яке відбувається до механічного зіткнення магнітів. Сила тяжіння згідно (11), [1] обернено пропорційна четвертій міри відстані між центрами магнітів. Енергія взаємодії притягнутих магнітів дорівнює енергії зв'язку.

При вимірі сили необхідної для розриву магнітів, що злиплися торцями, і магнітів, сполучених анти паралельно, бічними сторонами, з орієнтацією протилежними полюсами один до одного, виявиться, що в другому випадку

потрібні значніші зусилля. Зв'язок магнітів при анти паралельному з'єднанні, значно сильніше, ніж сполучених послідовно. Що, власне, і відповідає правилу (15) [1].

При анти паралельному з'єднанні взаємодіють чотири полюси магнітів, два полюси одного магніту з двома полюсами іншого. При послідовному з'єднанні взаємодіють тільки два протилежні полюси магнітів. Два інших розділені відстанню в дві довжини магнітів. Відповідно і енергія зв'язку послідовно і анти паралельно сполучених диполів відрізняється майже в два рази.

Представляє інтерес взаємодія порожнистих, тонкостінних, трубчастих магнітів однакової довжини, не значно різних діаметрів, що дозволяє магніту меншого діаметру всовуватися в магніт більшого діаметру.

На відстані порожнисті магніти взаємодіятимуть також як цілісні. Тяжіння їх відбуватиметься до моменту початку входження одного магніту в інший. Перед початком входження вони зупиняться, хоча механічної перешкоди їх зближенню немає. Більше того, на повністю всунутий магніт діятиме сила виштовхування. При виході внутрішнього магніту за межі зовнішнього, відштовхування змінюється тяжінням.

Пояснення цьому дає формула потенціалу диполя (3), [1]

$$\varphi_d = -ql \cos\theta / (r^2 - rl \cos\theta).$$

При співвісному розташуванні диполів  $\cos\theta = 1$ . Формула потенціалу диполя приймає вид  $\varphi_d = -\frac{ql}{r^2 - rl} = -\frac{d}{r^2(1 - \frac{l}{r})}$ . На відстанях між магнітами, що перевищують характерну довжину,  $r > l$  відношенням  $l/r$  в знаменнику можна нехтувати, і потенціал дорівнюватиме  $\varphi_d (r > l) \approx -d/r^2$ .

При зближуванні магнітів і входженням одного в другий, в знаменнику можна нехтувати одиницею порівняно відношення  $l/r$ ,  $\varphi_d (r < l) = -\frac{d}{r^2(1 - \frac{l}{r})} \approx +\frac{d}{rl}$ . Знак потенціалу зміниться. Відповідно тяжіння зміниться відштовхуванням.

Таким чином, дипольним взаємодіям присутній мінімальний радіус тяжіння, при якому негативна енергія взаємодії дорівнює енергії зв'язку диполів.

На відстанях менших цього радіусу, енергія взаємодії позитивна, між диполями діють сили відштовхування.

Ці особливості взаємодії властиві усім часткам і мікрооб'єктам, електричні або магнітні поля, яких мають дипольні властивості.

Орієнтація диполів різнойменними полюсами один до одного стійка. Це пояснюється тим, що момент сил, що діє на диполь в полі іншого диполя дорівнює векторному твору його дипольного моменту на вектор напруженості поля іншого диполя (13), [1]. При співвісній орієнтації диполів цей твір дорівнює нулю, та при будь-якому відхиленні диполя, виникає момент сил спрямований на усунення цього відхилення.

Моменти сил, що діють на диполі орієнтовані однойменними полюсами один до одного також дорівнюють нулю, але при їх щонайменшому кутовому

відхиленні виникають моменти сил спрямовані на збільшення цього відхилення і розвороту магнітів різнойменними полюсами один до одного.

Момент сил, що діє на диполі, призводить до переважної реалізації сил тяжіння диполів. Взаємодія безлічі вільних хаотично орієнтованих диполів призводить до їх взаємної, колективної орієнтація з пониженням енергії взаємодії і взаємному тяжінню диполів, що наочно підтверджує злипання намагніченої залізної тирси в грудку. Це є найважливішою рисою взаємодії диполів. Між вільними диполями завжди реалізується взаємне тяжіння.

В результаті взаємного тяжіння диполі утворюють різні асоціації.

Два диполі пов'язані послідовно протилежними полюсами один до одного, (схематично  $\Rightarrow\Rightarrow$ ), мають тільки один зв'язок полюсів на два диполі, якому відповідає певна енергія зв'язку. Дипольний момент послідовного зв'язку диполів зростає пропорційно кількості пов'язаних диполів.

Диполям пов'язаним анти паралельно, бічними сторонами з протилежною орієнтацією полюсів, (схематично  $\uparrow\downarrow$ ), що утворює квадруполь з двома зв'язками полюсів, відповідає удвічі більша енергія зв'язку. Дипольний момент анти паралельного з'єднання диполів дорівнює нулю при парному числі диполів і одному при непарній кількості диполів.

Енергія зв'язку трьох диполів, пов'язаних послідовно протилежними полюсами, у вигляді замкнутого ланцюжка, що має три зв'язки полюсів на три диполі, разу в три більше енергії послідовного з'єднання двох диполів.

Найбільш сильний зв'язок утворюється при з'єднанні двох квадруполів в октуполь. Таке з'єднання чотирьох диполів містить вісім зв'язків між полюсами диполів. Енергія зв'язку октуполя не менше чим у вісім разів може перевищувати енергію послідовного з'єднання двох диполів.

Залежність сил, що зв'язують диполі, від відстані визначається мультипольністю асоціації. Сила взаємодії між зарядами убуває обернено пропорційно до квадрата відстані між ними, заряду з диполем – кубу відстані, диполя з диполем – четвертій мірі, квадруполя з диполем – п'ятою, квадруполя з квадруполем – шостій, октуполя з квадруполем – сьомій і октуполя з октуполем – восьмій мірі відстані.

Зв'язки асоціацій високої міри мультипольности, таких як квадруполі і октуполі руйнуються при щонайменшому збільшенні відстані між ними. Радіус дії сил з'єднуючих асоціації диполів нікчемне малий, в порівнянні з радіусом дії сил між зарядами. Хоча порядок сили може бути не порівняно більше порядку сил що зв'язують заряди.

Анти паралельним з'єднанням не можна зв'язати непарне число диполів, так щоб усі сусідні диполі були орієнтовані протилежними полюсами один до одного, деякі диполі, що є сусідні, будуть зорієнтовані однойменними полюсами, що знижує сумарну енергію взаємодії.

Послідовне з'єднання не має цієї заборони, але при однаковій кількості диполів, енергія зв'язку послідовного з'єднання у декілька разів менше.

Перерахуємо основні властивості дипольних взаємодій:

1. Моменти сил взаємодіючих диполів, орієнтують їх, так, щоб енергія взаємодії була мінімальна. Між вільними диполями завжди реалізується взаємне тяжіння.

2. Сили взаємного тяжіння диполів обернено пропорційні четвертої міри відстані між ними, а сили, що зв'язують асоціації диполів, таких як квадруполі або октуполі – обернено пропорційні до шостої і восьмої міри відстані. Сили дипольних взаємодій є короткодійними силами.

3. Сили дипольних взаємодій і їх асоціацій залежать від взаємної орієнтації диполів.

4. Залежно від взаємної орієнтації і завдяки наявності моментів сил, сили дипольних взаємодій можуть носити не центральний характер.

5. Енергія зв'язку диполів відрізняється на дискретну величину в залежності від способу їх розташування один відносно другого (анти паралельно, або співвісне), і може мати декілька дискретних рівнів.

6. Дипольним взаємодіям властиве насичення, що полягає в тому, що кожен окремих диполь, унаслідок швидкого убування сил взаємодії з відстанню, взаємодіє переважно з сусідніми диполями і слабо взаємодіє з віддаленими диполями. З цієї причини енергія взаємодії, віднесена до одного диполя, із зростанням їх кількості змінюється мало, практично постійна.

7. Дипольним взаємодіям присутній граничний радіус зближення, ближче за якого тяжіння змінюється відштовхуванням. Граничний радіус має порядок характеристичного розміру диполя. Ця властивість дозволяє диполям об'єднуватися в статичні утворення, чи асоціації з відстанями між ними, які відповідають мінімуму енергії взаємодії.

8. Енергія зв'язку декількох (більше двох) диполів проявляє залежність від парності або непарності їх числа.

9. Енергія взаємодії диполів, згідно (9), [1] пропорційна твору дипольних моментів і обернено пропорційна до третьої міри відстані між ними,  $W(d_1 d_2) \propto \frac{d_1 d_2}{r^3} \approx \frac{q^2 l^2}{r r^2}$ . Залежно від співвідношення  $l/r$ , енергія взаємодії їх може мати будь-які значення, що не перевищують власної енергії диполів

10. Дипольний момент анти паралельного з'єднання парного числа диполів дорівнює нулю, непарного числа диполів – одному моменту.

11. При послідовному з'єднанні диполів їх моменти підсумовуються, але енергія їх зв'язку значно менше енергії анти паралельного з'єднання, що знижує вірогідність його реалізації і число таких асоціацій.

Наявність дипольності електричних полів деяких атомів призводить до об'єднання їх в молекули. З цієї причини в атмосфері практично немає атомарного водню або кисню. Можна вважати, що дипольність і можливо дещо більш, але не дуже висока міра мультипольності електричних полів багатьох інших елементів є причиною об'єднання їх в складні молекули.

Висока міра мультипольності електричних полів атомів інертних газів і, як наслідок, швидке убування сил взаємодії з відстанню є причиною того що інертні гази практично не утворюють зв'язаних станів [2].

Таким чином, дипольні і мультипольні електричні взаємодії є причиною зв'язку атомів в молекули. Де можна спостерігати дипольні магнітні взаємодії, в наступній доповіді.

### Список використаних джерел:

1. Степанець Ю. А. Попенко В. Й. Взаємодії електричних диполів Тези для наукової конференції «Перспективи розвитку сучасної науки» 2015.
2. Джексон Дж. Класична електродинаміка, М. Світ 1965.

### Попенко В.Й.

*старший науковий співробітник,  
Науково-виробнича корпорація «Київський інститут автоматики»*

## ДИПОЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ І ВЗАЄМОДІЇ МІЖ НУКЛОНАМИ

Ядра атомів складаються з протонів і нейтронів, що називаються нуклонами, які пов'язані ядерними силами, маючи наступні властивості [1].

1. Ядерні сили є силами тяжіння між нуклонами.
2. Ядерні сили є короткодійними силами. Вважається, що радіус їх дії має порядок  $10^{-13}$  см.
3. Ядерні сили істотно залежать від орієнтації їх спінів. Спін частки паралельний або анти паралельний її магнітному моменту, тому залежність ядерних сил від орієнтації спінів можна трактувати їх залежністю від орієнтації магнітних моментів.
4. Ядерні сили не центральні, тобто можуть бути спрямовані під кутом до прямої, що сполучає взаємодіючі частки.
5. Енергія зв'язку нуклонів в ядрах має безліч різних дискретних рівнів.
6. Ядерні сили мають властивість насичення, що проявляється в тому, що зі збільшенням числа нуклонів ядра енергія зв'язку на нуклон не росте пропорційно числу нуклонів, а залишається приблизно постійною.
7. Ядерні сили притягують нуклони в області  $10^{-13}$  см, але на істотно менших відстанях переходять в сили відштовхування.
8. Ядерні сили проявляють залежність від парності або непарності взаємодіючих нуклонів.
9. Ядерні сили великі за абсолютною величиною. Енергія зв'язку простішого ядра, дейтрона рівна 2,26 М еВ і складає 0,12% власній енергії нуклона. Енергія зв'язку електрона К оболонки важких атомів, в тисячі разів перевищуючи енергію зв'язку електрона атома водню, складає так само величину порядку (0,01 ÷ 0,1)% власної енергії електрона.
10. Магнітний момент парно – парних ядер, тобто з парним числом протонів і нейтронів дорівнює нулю.
11. Для інших ядер магнітний момент не перевищує десяти одиниць.