

МРНТИ: 29.01.05

Б.А. Мукушев, А.Б. Мукушев

Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан
(E-mail: mba-55@mail.ru, abzal-kz@mail.ru)

Исследование закономерностей физических взаимодействий посредством энергии связи

Аннотация: статья посвящена раскрытию теоретических вопросов явления энергии связи, которая занимает центральное место в исследовании взаимодействующих тел различной природы. На примерах гравитационного и электростатического притяжения проанализированы закономерности энергии связи взаимно притягивающихся тел и зарядов. С помощью уравнений энергии связи доказано несостоятельность томсоновской модели водорода. Исследованы закономерности межмолекулярных взаимодействий, имеющих место в жидкостях и твердых телах. Раскрыты механизмы взаимодействия молекул и атомов на основе энергетического подхода. Посредством изучения молекулярной структуры вещества рассмотрена природа межатомного взаимодействия и вычислено значение энергии связи для этих атомов. Свойства устойчивости и неустойчивости атомного ядра исследованы с позиции энергии связи между нуклонами.

Ключевые слова: энергия связи, потенциальная яма, энергия ионизации, межатомное взаимодействие, межмолекулярные силы, ядерные силы.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-137-4-34-42>

Поступила: 11.11.2021/ Допущена к опубликованию: 20.11.2021

Введение. При изучении структуры атомного ядра и процессов, происходящих в его недрах, на основе закономерностей энергии связи разъясняются явление устойчивости и фактор неустойчивости атомного ядра, изучаются закономерности радиоактивности и ядерных энергий, раскрываются механизмы различных ядерных реакций и другие вопросы.

Однако понятие «энергия связи» не должно ограничиваться вопросами ядерной физики. Это физическое понятие, как одна из разновидностей потенциальной энергии, имеет широкое применение в исследовании различных по природе систем, состоящих из взаимно притягивающихся тел или частиц. Сюда относятся всякие физические объекты, где силой взаимодействия является любая сила притяжения, сила тяготения к Солнцу или планете, кулоновская сила в атомах, ван-дер-ваальсовы силы в реальных газах, силы взаимодействия между атомами и молекулами в кристаллах и жидкостях и т.д.

Потенциальная энергия изолированной системы взаимно притягивающихся тел есть *энергия связи* системы. Энергия связи - это физическая величина, численно равная работе, совершаемой силами притяжения при удалении тел из данного расположения на бесконечное расстояние друг от друга. Эту необходимую работу называют по-разному для различных систем связанных тел или частиц: потенциальной энергией между ИСЗ и Землей, при движении спутника вокруг Земли; в случае удаления электрона из атома – работой ионизации атома, в случае отрыва одной частицы молекулы от другой – работой диссоциации молекулы. В случае выхода молекулы жидкости за пределы ее свободной поверхности говорят о работе испарения (или теплоте испарения), при выходе нуклона из ядра говорят об энергии связи ядра.

Максимальная потенциальная энергия тела (или частицы) соответствует телам (или частицам), удаленным на бесконечно большое расстояние от других тел (частиц), когда они

не тяготеют друг к другу. В этом случае, говорят, что тело или частица вырвались из *потенциальной ямы*. Иногда потенциальная яма носит название потенциального ящика, когда зависимость *потенциальной энергии* системы от расстояния не известна [1].

Методы исследования. При исследовании закономерностей физических взаимодействий между телами и частицами использованы следующие методы: физическое и математическое моделирование, графический анализ физических взаимодействий, дифференциальное исчисление уравнений и энергетический подход в изучении физических процессов.

Научные результаты. Рассмотрим ряд примеров, посвященных системе связанных тел или частиц, при анализе которых следует использовать свойств «энергии связи».

Механика. Для любой системы тел, находящихся на конечных расстояниях, гравитационная энергия отрицательна, а для бесконечно удалённых, то есть для взаимно не тяготеющих тел, их потенциальная энергия равна нулю. Полная энергия системы, равная сумме гравитационной и кинетической энергий, постоянна. Следующий пример может раскрыть основные свойства энергии связи, присущие изолированной механической системе [2].

Пример 1. а) Нужно найти энергию связи космического аппарата (КА) массой m , движущегося около Земли по круговой орбите. Считать систему «КА-Земля» изолированной. Считать радиус орбиты равным радиусу Земли.

б) Чему равна энергия связи изолированной системы «КА-Земля», где космический аппарат имеет вблизи Земли вторую космическую скорость по направлению, перпендикулярному радиусу Земли?

в) В каком интервале механической энергии изолированной системы «КА-Земля» находится значение энергии связи КА, движущегося около Земли по эллипсоидальной орбите?

Анализ. а) Общая механическая энергия КА массой m вблизи Земли состоит из суммы кинетической энергии и потенциальной энергии:

$$E = K + U \text{ отсюда } E_{\text{св.}} = \frac{m\vartheta^2}{2} - \frac{GmM_3}{R_3}$$

Центростремительную силу, действующую на КА, направленную к центру Земли создает сила тяготения Земли. Значит,

$$\frac{m\vartheta^2}{R_3} = \frac{GmM_3}{R_3^2} \Rightarrow m\vartheta^2 = \frac{GmM_3}{R_3}$$

Итак,

$$E_{\text{св.}} = -\frac{GmM_3}{2R_3}$$

б) Если КА вблизи Земли приобретет вторую космическую скорость, тогда он навсегда покинет поле тяготения Земли. Напишем закон сохранения механической энергии для изолированной системы «КА-Земля». В этом случае КА уходит в бесконечность, и он не связан с Землей. Значит, энергия связи КА равна нулю $E_{\text{св.}} = 0$. Отсюда $0 = \frac{m\vartheta^2}{2} - \frac{GmM_3}{R_3}$

Значение второй космической скорости равно $v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_3}{R_3}}$

в) Искомый интервал механической энергии системы «КА-Земля», где космический аппарат движется по эллипсоидальной орбите, можно писать в таком виде: $-\frac{GmM_3}{2r} < E_{\text{св.}} < 0$

Электростатика. Ключевые свойства электрических сил точечных разноименных зарядов аналогичны свойствам гравитационных сил между материальными точками. По этому мы будем использовать для описания свойств электростатических объектов основные закономерности гравитации [3].

Пример 2. Вычислите энергию ионизации атома водорода в единицах эВ. *Анализ.* Сила притяжения между электроном и ядром выражается формулой $F = k\frac{e^2}{r^2}$ соответственно потенциальная энергия взаимодействия этих частиц $U(r) = k\frac{e^2}{r}$. Полная энергия электрона

$E = \frac{m\dot{\vartheta}^2}{2} - k\frac{e^2}{r}$, m и e - масса и заряд электрона. С другой стороны, $\frac{m\dot{\vartheta}^2}{2} = -k\frac{e^2}{2r}$, следовательно $E = E_{\text{св.}} = -k\frac{e^2}{2r}$. Это выражение есть энергия связи системы «электрон-ядро» в атоме водорода. При $r = 0,5 \cdot 10^{-10}\text{м}$

$$E_{\text{св.}} = -9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-10} \approx -2,3 \cdot 10^{-18}(\text{Дж}) \approx -13,6(\text{эВ})$$

Данное численное значение энергии называется энергией ионизации водорода, то есть, чтобы получить ион водорода, нужно затратить энергию, равную 13,6 эВ.

Пример 3. Вычислить согласно модели Томсона энергии связи (ионизации) атома водорода, если известно, что радиус атома водорода равен $0,5 \cdot 10^{-10}\text{м}$. *Примечание.* Воспользоваться формулой распределения потенциала для однородного заряженного шарика в интервале $0 \leq r \leq R$: $\varphi(r) = \frac{\rho}{6\epsilon_0}(3R^2 - r^2)$. Здесь $\rho = \frac{q}{4\pi r^3/3}$ - плотность заряда шарика.

Анализ. По Томсону модель атома представляет собой шарик с положительным зарядом, равномерно распределённым по объёму. А отрицательно заряженный электрон находится в центре этого шарика. Здесь $\rho = \frac{q}{4\pi r^3/3}$ - плотность заряда атома водорода по Томсону. Тогда получим $\varphi(r) = \frac{e}{8\pi R^3\epsilon_0}(3R^2 - r^2) = \frac{ke}{2R^3}(3R^2 - r^2)$, где $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k$ Потенциальная энергия электрона

$$U(r) = -\varphi(r)e = -\frac{ke^2}{2R^3}(3R^2 - r^2) \text{ здесь } 0 \leq r \leq R$$

Нарисуем потенциальную яму электрона в атоме водорода по Томсону (рис.1).

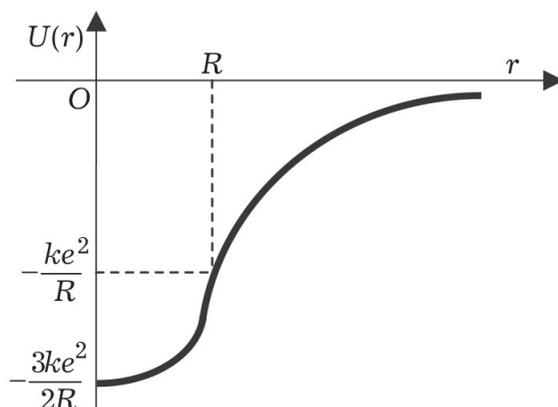


Рисунок 1 – График потенциальной энергии электрона в атоме водорода по Томсону

$U(R) = -\frac{ke^2}{R}$ -потенциальная энергия электрона для случая, когда он расположен на поверхности атома.

$U(0) = -\frac{3ke^2}{2R}$ - энергия связи электрона, когда он находится в центре атома (лежит на дне потенциальной ямы). Чтобы вывести электрон в бесконечность, нужно затратить работу, равную энергии связи электрона по модулю:

$$A = |E_{\text{св.}}| = |U(0)| = \frac{3ke^2}{2R} \approx 69,12 \cdot 10^{-19}\text{Дж.} \approx 43,2\text{эВ.}$$

Заметим, что полученное нами значение достаточно далеко от действительного значения энергии ионизации (смотрите задачу 4). Это лишний раз свидетельствует о несостоятельности томсоновской модели водорода.

Твердые тела и жидкости. Между молекулами вещества существуют силы взаимодействия (притяжение и отталкивание), называемые молекулярными силами. Если бы между молекулами не было сил притяжения, то все вещества при любых условиях находились бы только в газообразном состоянии. Лишь благодаря силам притяжения молекулы удерживаются друг возле друга и образуют жидкие и твердые тела. Молекулярные силы

проявляются только в том случае, когда расстояния между молекулами весьма малы, порядка эффективных размеров самих молекул. При увеличении расстояния между ними в несколько раз силы становятся практически равными нулю. Именно этим и объясняется тот факт, что при анализе явлений в газах, где расстояния между молекулами примерно в 10 раз больше, чем в жидкостях или твердых телах, можно в большинстве случаев пренебречь действием молекулярных сил [4, 5].

Молекулы жидкости, находящиеся на поверхностном слое, обладают избытком энергии по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости. Пояснение этого заключается в том, что внутри жидкости каждая молекула окружена 12 молекулами. Энергия связи этих молекул - $U_{\text{ж}} \approx 12u_0$. Здесь u_0 - среднее значение энергии взаимодействия, приходящей на одну молекулу жидкости. Следовательно, каждая молекула в поверхности жидкости окружена примерно на два раза меньше себе подобными молекулами. Значит, ее потенциальная энергия (энергия связи) - $U_{\text{ж}} \approx 6u_0$. Поскольку $u_0 < 0$ легко обнаружить $U_{\text{пов}} > U_{\text{ж}}$ (рис.2).

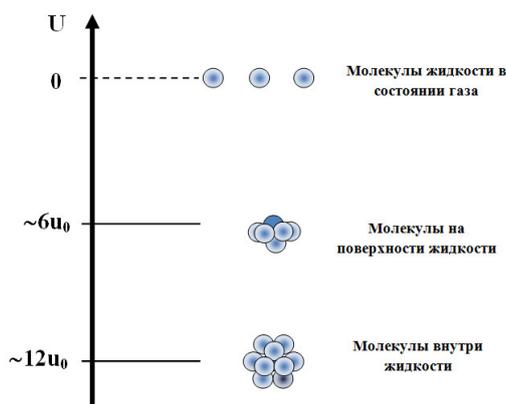


Рисунок 2 – Величины потенциальной энергии по отношению к каждому слою жидкости и к газовому состоянию

Для того чтобы вывести молекулу жидкости изнутри на ее свободную поверхность надо затратить работу $A = U_{\text{пов}} - U_{\text{ж}} = -6u_0 > 0$. Следовательно, молекула, находящаяся на поверхностном слое, имеет избыток энергии по сравнению с глубинными молекулами, равный $6u_0$. Пусть на единице поверхности жидкости содержится n молекул. Поверхностный слой площадью S будет обладать избытком энергии (или свободной энергией):

$$U_{\text{пов}} = 6nS|u_0|$$

Избыток энергии, приходящейся на единицу площади поверхности жидкости, называется коэффициентом поверхностного натяжения:

$$\sigma = U_{\text{пов}}/S = 6n|u_0|$$

Итак, жидкость и его поверхность находятся в потенциальной яме, вернее, потенциальном ящике, а молекулы, из которых состоит жидкость и ее поверхностный слой, взаимно притягиваются.

Пример 4. Вычислить приращение свободной энергии поверхностного слоя при изотермическом слиянии двух одинаковых капель ртути, каждая радиусом 0,8 мм.

Анализ. Обе капли обладают свободной энергией $2W_{\text{пов}} = 2\sigma \cdot 4\pi r^2$. После слияния образовавшаяся капля имеет $W'_{\text{пов}} = \sigma \cdot 4\pi R^2$;

$$\Delta W = |2W_{\text{пов}}| - |W'_{\text{пов}}| = 4\pi\sigma(2r^2 - R^2)$$

Если v и V - объемы капель до и после слияния, то $2v = V$ или $2\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi R^3$ отсюда $R = r \cdot \sqrt[3]{2}$ подставляя, получим $\Delta W = 4\pi\sigma r^2(2 - \sqrt[3]{4}) > 0$, значит, энергия выделяется $\Delta W \approx 1,64 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Пример 5. Нужно найти удельную энергию связи молекул льда вблизи 0°C . Примечание. Разность энергии одной молекул кристалла и энергии изолированных молекул этого тела называется удельной энергией связи.

Анализ. Известно, что температура льда соответствует температуре его плавления. Значит, при нагревании льда сразу начнется процесс плавления и увеличится его внутренняя энергия на ΔU . Согласно первому закону термодинамики, изменение внутренней энергии льда равно

$$\Delta U = Q - A$$

$$Q = \lambda m + c_{\text{вода}} m \Delta t + Lm$$

где $\lambda = 3,34 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, $c_{\text{вода}} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$, $L = 2,257 \cdot 10^6 \text{ Дж./кг}$, $\Delta t = 100^{\circ}\text{C}$
 $A = p(V_{\text{пар}} - V_{\text{вода}})$, где $p = 1 \text{ ат.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Но объем пара при температуре кипения примерно в 1000 раз больше объема воды, следовательно, с большой степенью точности можно считать, что $A = pV_{\text{пар}}$

$$\Delta U = Q - A = \lambda m + c_{\text{вода}} m \Delta t + Lm - pV_{\text{пар}} = m(\lambda + c_{\text{вода}} \Delta t + L - p/\rho)$$

где ρ - его плотность пара при температуре кипения. Следовательно, внутренняя энергия 1 кг водяного пара больше внутренней энергии 1 кг льда при температуре плавления на величину

$$\frac{\Delta U}{m} = \lambda + c_{\text{вода}} \Delta t + L - \frac{p}{\rho}$$

Для пара при температуре 100°C и при давлении 1 ат. $\rho = 0,589 \text{ кг/м}^3$

Таким образом,

$$\frac{\Delta U}{m} = 2,839 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

1 кг лед содержит $N = N_A/M = 3,35 \cdot 10^{25} \text{ кг}^{-1}$, тогда как энергия одной молекулы пара больше энергии одной молекулы льда на величину

$$|E_{\text{св.}}| = \frac{2,839 \cdot 10^6}{3,35 \cdot 10^{25}} \text{ Дж} = 8,47 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} \approx 0,53 \text{ эВ}$$

Таким образом, удельная энергия связи молекул льда вблизи 0_0 C равна

$$E_{\text{св.}} = -0,53 \text{ эВ}$$

Пример 6. На рисунке 3 построен график потенциальной энергии $U(r)$ взаимодействия двух атомов в молекуле (r – расстояние между центрами атомов). Общая механическая энергия (энергия связи) изолированной системы, состоящая из двух взаимодействующих атомов $E = -2 \text{ эВ}$.

- Чему равны K и U при $r = r_1$?
- Чему равны K и U при $r = r_2$?
- Какова результирующая сила при $r = r_1$?

Анализ. С помощью графика потенциальной энергии можно определить значения $U(r)$. При $r = r_1$ имеем $U(r) = -5 \text{ эВ}$, а при $r = r_2$ $U(r) = -2 \text{ эВ}$. Кинетическую энергию находим из соотношения $K = E - U$:

- при $r = r_1$ $K = (-2 \text{ эВ}) - (-5 \text{ эВ}) = 3 \text{ эВ}$,
- при $r = r_2$ $K = (-2 \text{ эВ}) - (-2 \text{ эВ}) = 0$.
- элементарная работа при перемещении частицы в поле притяжения равна

$$\delta A = -dU(r) = F dr \text{ отсюда } F = -\frac{dU}{dr}$$

При $r = r_1$ $\frac{dU}{dr} = 0$, следовательно, $F(r_1) = 0$.

Пример 7. Потенциальная энергия двухатомной молекулы представлена как сумма энергии притяжения $\frac{b}{r^3}$ и короткодействующего отталкивания $\frac{a}{r^5}$. Таким образом, $U(r) = \frac{a}{r^5} - \frac{b}{r^3}$ (Рис.4). Нужно найти энергию связи атомов или глубину «потенциальной ямы» данной системы.

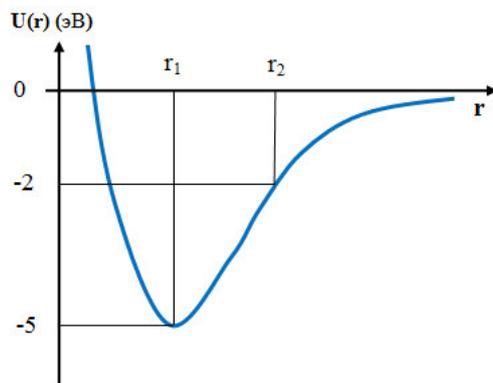


Рисунок 3 – График потенциальной энергии взаимодействия двух атомов в молекуле

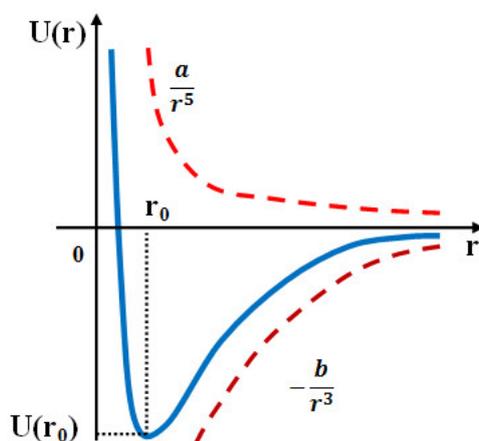


Рисунок 4 – График потенциальной энергии двухатомной молекулы

Анализ. Энергию связи двухатомной системы можно интерпретировать как энергию, равную работе, которую необходимо затратить, чтобы разделить эту систему на атомы и удалить их друг от друга на такое расстояние, на котором их взаимодействием можно пренебречь.

Положение равновесия можно найти, решив относительно r уравнение $\frac{dU(r)}{dr} = 0$. Поскольку

$$\frac{dU(r)}{dr} = -\frac{5a}{r^6} + \frac{3b}{r^4}$$

То, полагая эту величину равной нулю, имеем

$$-\frac{5a}{r_0^6} + \frac{3b}{r_0^4} = 0 \Rightarrow r_0 = \sqrt{\frac{5a}{3b}}$$

$$U(r_0) = \frac{a}{r_0^5} - \frac{b}{r_0^3} = \frac{a}{\left(\frac{5a}{3b}\right)^{\frac{5}{2}}} - \frac{b}{\left(\frac{5a}{3b}\right)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{6b^2}{25a} \sqrt{\frac{3b}{5a}}$$

Ядро атома. Стабильность атомного ядра характеризуется так называемой энергией связи ядра, которая равна работе, необходимой для полного расщепления ядра на составляющие его нуклоны без сообщения им кинетической энергии. Для расчета энергии связи ядра необходимо, казалось бы, точно знать, как силы притяжения между нуклонами (ядерные силы) зависят от расстояния между ними (вспомним теоретическое вычисление энергии связи электрона в

атоме). Однако эта зависимость пока неизвестна. Оказалось, энергию связи можно определить, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2$$

С помощью современных методов измерения атомных масс было установлено, что масса покоя ядра $M_{\text{Я}}$ всегда меньше суммы масс покоя слагающих его протонов и нейтронов:

$$M_{\text{Я}} < Zm_p + Nm_n$$

Z, N – число протонов и нейтронов, m_p, m_n – массы покоя протона и нейтрона.

Разность масс комплектующих ядро частиц и массы ядра в виде:

$$Zm_p + Nm_n - M_{\text{Я}} = \Delta m$$

носит название дефекта масс. Согласно формуле Эйнштейна напишем выражение энергия связи ядра:

$$|E_{\text{св}}| = \Delta mc^2$$

При образовании ядра из частиц последние за счет притяжения ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением (соответственно с большой скоростью) друг к другу. При этом излучаются гамма-кванты, которые обладают энергией $|E_{\text{св}}|$ и массой Δm , либо образуются новые частицы со значительной кинетической энергией. Разумеется, энергия связи ядра имеет отрицательный знак $E_{\text{св}} < 0$.

Поскольку атомное ядро, относящиеся к нерадиоактивным химическим элементам, находится в более стабильном состоянии, оно лежит на дне потенциального ящика глубиной, равной энергии связи ядра. Из элементов только водород не имеет энергии связи ядра (энергией связи электрона с протоном можно пренебречь, поскольку эта величина (13,6 эВ) в 162 000 раза меньше энергии связи ядра, например, дейтрона (2,2 МэВ)). На рисунке 5 приведен качественный график (потенциальный ящик) зависимости энергии связи ядра от расстояния r от центра ядра.

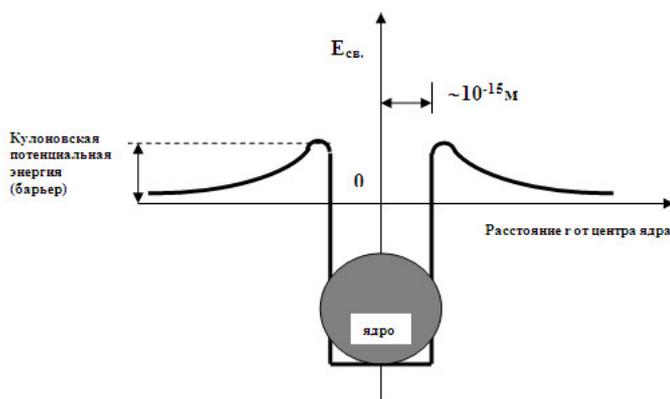


Рисунок 5 – Качественный график зависимости энергия связи ядра от расстояния r от центра ядра.

Пример 8. Вычислите энергию связи ядра ${}^16_8\text{O}$

Анализ. $|E_{\text{св}}| = [(Zm_p + Nm_n) - m({}^16_8\text{O})]c^2 = 931[(8 \cdot 1,00783 + 8 \cdot 1,00867) - 15,99491] \approx 127,62$ МэВ. Энергия связи ядра ${}^16_8\text{O}$ в расчете на один нуклон составляет, таким образом, 7,98 МэВ.

Пример 9. Найти энергию связи нейтрона в ядре ${}^17_8\text{O}$

Анализ. Энергия связи нейтрона, находящегося в ядре, есть та энергия, которую надо затратить, чтобы отделить нейтрон от ядра без сообщения ему кинетической энергии, то есть

вырвать его из потенциального ящика, приведенного на рисунке 6. Если отделить нейтрон от ядра останется ядро ${}^8_{16}\text{O}$. Следовательно, напишем выражение затраченной энергии в виде $|E_{sv}| = [(m({}^8_{16}\text{O}) + m_n) - m({}^8_{17}\text{O})]c^2$, где $m({}^8_{16}\text{O})$, $m({}^8_{17}\text{O})$ и m_n – соответственно массы покоя ядер кислорода и нейтрона. Используя, табличные данные, находим

$$E_{sv} = 931[(15,99491 + 1,00867) - 16,99913] = 4,14\text{МэВ}$$

Закключение. Рассмотрены теоретические вопросы явления энергии связи, имеющей место в физических объектах, где силой взаимодействия является любая сила притяжения. Нами получены следующие научные результаты: - проанализированы закономерности энергии связи взаимно притягивающихся тел и зарядов, которые имеют гравитационную и электростатическую природу; - на основе энергии связи доказано, что томсоновская модель водорода не может существовать; - исследованы закономерности межмолекулярных взаимодействий в жидкостях и твердых телах. Раскрыты механизмы взаимодействия молекул и атомов на основе энергетического подхода; - посредством изучения молекулярной структуры вещества рассмотрена природа межатомного взаимодействия и вычислено значение энергии связи для этих атомов; - свойства устойчивости и нестабильности атомного ядра исследованы с позиции энергии связи между нуклонами.

Список литературы

- 1 Мукушев Б.А., Мукушев А.Б., Таширова М.Б., Аширбаева Д.Н., Калхаман К.С., Салмырза Г.Ж., Сахиева С.М. Реализация вычислительных экспериментов для изучения небесной механики на основе энергетического подхода // Вестник ЕНУ (Физика). - 2021. - № 3. - С. 25-34.
- 2 Киттель Ч., Найт В., Рудерман М. Механика (Берклевский курс физики) Учебное руководство. - Москва: Наука. Физматлит, 1983. - 448 с.
- 3 Яворский Б.М., Пинский А.А. Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. - Москва: Наука. Физматлит, 1981. - 480 с.
- 4 Feynman R., Leighton R., Sands M. The Feynman lectures on physics. Volume 2. - London: Addison-wesley publishing company, 1964. – 288 p.
- 5 Яворский Б.М., Пинский А.А. Колебания и волны. Квантовая физика. Том 2. - Москва: Наука. Физматлит, 1981. - 448 с.

Б.А. Мукушев, А.Б. Мукушев

S. Seifullin atyndaғы қазақ агротехникалық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

Байланыс энергиясы құбылысы көмегімен физикалық өзара әрекеттесу заңдылықтарын зерттеу

Аннотация. Мақала табиғаты әртүрлі денелердің өзара әрекеттесу процесін зерттеуде басты орын алатын байланыс энергиясы құбылысының теориялық мәселелерін ашуға арналған. Өзара тартылыс жағдайындағы нысандардың күйі байланыс энергиясы арқылы сипатталады. Денелер мен зарядтардың гравитациялық және электростатикалық тартылыс құбылысын сипаттайтын байланыс энергиясының заңдылықтары талқыланды. Әр түрлі күйдегі заттарды құрайтын молекулалар мен атомдар арасындағы өзара әрекеттесу құбылысының механизмі энергетикалық тұрғыдан қарастырылды. Заттың молекулалық құрылымын зерттеу арқылы атомаралық өзара әрекеттесудің табиғаты қарастырылды және атомдардың өзара тартылысының байланыс энергиясы есептеледі. Сұйықтар мен қатты денелерде болатын молекула аралық өзара әрекеттесулердің заңдылықтары теориялық тұрғыдан талданды. Атом ядросының тұрақтылығы мен тұрақсыздығының қасиеттері ядроғағы байланыс энергиясы тұрғысынан зерттеледі.

Түйін сөздер: байланыс энергиясы, потенциалдық шұңқыр, иондалу энергиясы, атомаралық өзара әрекеттесу, молекулааралық күштер, ядролық күштер.

B.A. Mukushev, A.B. Mukushev

S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan

Investigation of the regularities of physical interactions by means of bonding energy

Abstract. The article is devoted to the disclosure of theoretical issues of the phenomenon of binding energy, which occupies a central place in the study of interacting bodies of various nature. The patterns of binding energy are analyzed using the examples of gravitational and electrostatic gravitation of bodies and charges. Using the binding energy equations, the authors have proved the inconsistency of the Thomson model of hydrogen. The article considers the nature of the interatomic interaction by studying the molecular structure of matter. The article calculates the value of the binding energy for these atoms. There are theoretically

investigated regularities of intermolecular interactions occurring in liquids and solids. The stability and instability properties of the atomic nucleus are investigated from the standpoint of the binding energy of the nucleus.

Keywords: binding energy, potential well, ionization energy, interatomic interaction, intermolecular forces, nuclear forces.

References

- 1 Mukushev B.A., Mukushev A.B., Tashirova M.B., Ashirbaeva D.N., Kalhaman K.S., Salmyrza G.Zh., Sakhieva S.M. Realizaciya vychislitel'nyh eksperimentov dlya izucheniya nebesnoj mekhaniki na osnove energeticheskogo podhoda, Vestnik ENU (Fizika) [Implementation of computational experiments for the study of celestial mechanics based on the energy approach, Bulletin of ENU (Physics)], 3, 25-34 (2021). [in Russian]
- 2 Kittel Ch., Knight V., Ruderman M. Mechanics [Mechanics] (Berkeley Physics course) Textbook (Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1983, 448 p.). [in Russian]
- 3 Yavorsky B.M., Pinsky A.A. Molekulyarnayafizika. Elektrodinamika. Volume 1 [Mechanics. Molecular physics. Electrodynamics] (Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1981, 480 p.). [in Russian]
- 4 Feynman R., Leighton R., Sands M. The Feynman lectures on physics. Volume 2 (London: Addison-wesley publishing company, 1964, 288 p.).
- 5 Yavorsky B.M., Pinsky A.A. Kolebaniyaivolny.Kvantovayafizika. Volume 2 [Vibrations and waves. Quantum Physics] (Moscow: Nauka.Fizmatlit., 1981, 448 p.). [in Russian]

Сведения об авторах:

Мукешев Б.А. - **основной автор**, доктор педагогических наук, профессор, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, пр. Победы, 62, Нур-Султан, Казахстан.

Мукешев А.Б. – PhD (экономика), старший преподаватель, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, пр. Победы, 62, Нур-Султан, Казахстан.

Mukushev B.A. - **The main author**, Professor of S. Seifullin Kazakh AgroTechnical University, Doctor of Pedagogical Sciences, 62 Pobedy ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

Mukushev A.B.-Ph.D. in Economics, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, 62 Pobedy ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.