

УДК 530.145.6
DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-55-60

Г. А. Кораблев, доктор химических наук, профессор, Ижевская государственная сельскохозяйственная академия

О МЕХАНИЗМЕ КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Введение

Проблема квантово-волнового дуализма была в основном решена в период создания квантовой механики. Так, применение уравнения де-Бройля позволяет определить границы проявления таких явлений. Но какое свойство при этом доминирует, зависит от условий процесса. И определить заранее, какая часть из них будет работать в каждом конкретном случае, достаточно сложно, хотя известно, что волновая картина чаще имеет место при низких энергиях, а корпускулярная – при высоких.

Один из основоположников квантовой механики Макс Борн по этому поводу сказал: «Каждый процесс может быть интерпретирован или с корпускулярной, или с волновой точки зрения. Однако доказательство того, что мы имеем дело действительно с частицами или с волнами, лежит за пределами наших возможностей, поскольку мы не в состоянии определить все характерные свойства процесса. Поэтому можно только сказать, что волновые и корпускулярные описания следует считать лишь как два дополняющих друг друга способа рассмотрения одного и того же объективного процесса» [1].

Таким образом, эти проблемные вопросы квантово-волнового дуализма нуждаются в дальнейшем исследовании и обсуждении. В данной работе делается попытка пояснения их с позиции представлений о пространственно-энергетических взаимодействиях.

О двух принципах сложения энергетических характеристик взаимодействий

Анализ кинетики разнообразных физико-химических процессов показывает, что во многих случаях складываются обратные величины скоростей, кинетических или энергетических характеристик соответствующих взаимодействий.

В частности, такое предположение подтверждается формулой вероятности процесса переноса электрона (W_∞) за счет перекрытия волновых функций (1) и (2) (в стационарном состоянии) при электронно-конформационных взаимодействиях:

$$W_\infty = \frac{1}{2} \frac{W_1 W_2}{W_1 + W_2}. \quad (1)$$

Уравнение (1) используется при оценке характеристик процессов диффузии, сопровождающейся безизлучательными переносами электронов в белках [2].

А также: «Из классической механики известно, что относительное движение двух частиц с энергией

взаимодействия $U(r)$ происходит, как движение материальной точки с приведенной массой μ

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (2)$$

в поле центральной силы $U(r)$, а общее поступательное движение – как свободное движение материальной точки с массой

$$m = m_1 + m_2. \quad (3)$$

Такое положение вещей имеет место и в квантовой механике» [3].

Для движущихся термодинамических систем первое начало термодинамики имеет вид

$$\delta E = d \left(U + \frac{mv^2}{2} \right) \pm \delta A, \quad (4)$$

где δE – количество энергии, сообщенное системе;

член $d \left(U + \frac{mv^2}{2} \right)$ характеризует изменения внутренней и кинетической энергий системы; $\pm \delta A$ – работа, выполненная системой; $-\delta A$ – работа, совершенная над системой.

Так как величина работы численно равна изменению потенциальной энергии, то

$$+\delta A = -\Delta U \quad (5)$$

и

$$-\delta A = +\Delta U. \quad (6)$$

Вероятно, не только в термодинамических, но и во многих других процессах в динамике взаимодействия движущихся частиц важно не только значение потенциальной энергии, но и ее изменение. Поэтому должно выполняться для двухчастичных взаимодействий условие

$$\delta E = d \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \right) \pm \Delta U. \quad (7)$$

Здесь

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (8)$$

где U_2 и U_1 – потенциальные энергии системы в конечном и начальном состояниях соответственно.

Был проведен анализ характера изменения величины потенциальной энергии (ΔU) по ее знаку для различных потенциальных полей (табл. 1).

Из таблицы видно, что значения $-\Delta U$ и, соответственно, $+\delta A$ (положительная работа) соответствуют взаимодействиям, происходящим по градиенту потенциала, а $+\Delta U$ и $-\delta A$ (отрицательная работа) имеют место при взаимодействиях против градиента потенциала.

Таблица 1. Направленность процессов взаимодействий

№	Системы	Вид потенциального поля	Процесс	U	r_2/r_1 (x_2/x_1)	U_2/U_1	Знак ΔU	Знак δA	Направление процесса в потенциальном поле
1	Разноименные эл. заряды	Электростатическое	Притяжение	$-k \frac{q_1 q_2}{r}$	$r_2 < r_1$	$U_2 > U_1$	-	+	По градиенту
			Отталкивание	$-k \frac{q_1 q_2}{r}$	$r_2 > r_1$	$U_2 < U_1$	+	-	Против градиента
2	Одноименные эл. заряды	Электростатическое	Притяжение	$k \frac{q_1 q_2}{r}$	$r_2 < r_1$	$U_2 > U_1$	+	-	Против градиента
			Отталкивание	$k \frac{q_1 q_2}{r}$	$r_2 > r_1$	$U_2 < U_1$	-	+	По градиенту
3	Элементарные массы m_1 и m_2	Гравитационное	Притяжение	$-\gamma \frac{m_1 m_2}{r}$	$r_2 < r_1$	$U_2 > U_1$	-	+	По градиенту
			Отталкивание	$-\gamma \frac{m_1 m_2}{r}$	$r_2 > r_1$	$U_2 < U_1$	+	-	Против градиента
4	Деформация пружины	Поле упругих сил	Сжатие	$k \frac{\Delta x^2}{2}$	$x_2 < x_1$	$U_2 > U_1$	+	-	Против градиента
			Растяжение	$k \frac{\Delta x^2}{2}$	$x_2 > x_1$	$U_2 > U_1$	+	-	Против градиента
5	Фотоэффект	Электростатическое	Отталкивание	$k \frac{q_1 q_2}{r}$	$r_2 > r_1$	$U_2 < U_1$	-	+	По градиенту

Решением этого уравнения через приведенную массу (μ) является уравнение Лагранжа для относительного движения изолированной системы двух взаимодействующих материальных точек с массами m_1 и m_2 , которое в координате x имеет вид

$$\mu x'' = -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}.$$

Здесь U – взаимная потенциальная энергия материальных точек; μ – приведенная масса. При этом $x'' = a$ (характеристика ускорения системы).

Для элементарных участков взаимодействий Δx можно принять $\frac{\partial U}{\partial x} \approx \frac{\Delta U}{\Delta x}$.

То есть $\mu a \Delta x = -\Delta U$. И тогда

$$\frac{1}{1/(a \Delta x) (1/m_1 + 1/m_2)} \approx -\Delta U; \quad (9)$$

$$\frac{1}{1/(m_1 a \Delta x) + 1/(m_2 a \Delta x)} \approx -\Delta U.$$

Или

$$\frac{1}{\Delta U} \approx \frac{1}{\Delta U_1} + \frac{1}{\Delta U_2}, \quad (10)$$

где ΔU_1 и ΔU_2 – потенциальные энергии материальных точек на элементарном участке взаимодействий;

Решение двухчастичной задачи взаимодействий двух материальных точек с массами m_1 и m_2 , полученное при условии отсутствия внешних сил, соответствует взаимодействиям, которые идут по градиенту, работа положительная, совершается системой (аналогично процессу притяжения в гравитационном поле).

ΔU – результирующая (взаимная) потенциальная энергия этих взаимодействий.

Таким образом:

1. В системах, в которых взаимодействие идет по градиенту потенциала (положительная работа), результирующая потенциальная энергия находится по принципу сложения обратных значений соответствующих энергий подсистем [4]. Аналогично рассчитывается приведенная масса для относительного движения изолированной системы двух частиц.

2. В системах, в которых взаимодействие идет против градиента потенциала (отрицательная работа), выполняется алгебраическое сложение их масс и также соответствующих энергий подсистем (аналогично гамильтониану).

Из уравнения (10) следует, что результирующая энергетическая характеристика системы такого взаимодействия двух материальных точек находится по принципу сложения обратных величин исходных энергий взаимодействующих подсистем.

«Электрон с массой m , движущийся около протона с массой M , эквивалентен частице с массой

$$m_{\text{пр}} = \frac{mM}{m+M} \gg [5, \text{с. 12}].$$

Поэтому, модифицируя уравнение (10), можно предположить, что энергия валентных орбиталей атома (ответственная за межатомные взаимодействия) может быть рассчитана [6] по принципу сложения

ния обратных величин некоторых исходных энергетических составляющих согласно уравнениям

$$\frac{1}{q^2/r_i} + \frac{1}{W_i n_i} = \frac{1}{P_3} \quad (11)$$

или

$$\frac{1}{P_0} = \frac{1}{q^2} + \frac{1}{(Wrn)_i}; \quad (12)$$

$$P_3 = \frac{P_0}{r_i}. \quad (13)$$

Здесь W_i – орбитальная энергия электронов [7]; r_i – орбитальный радиус i -й орбитали [8]; $q = Z^*/h^*$ – по [9]; n_i – число электронов данной орбитали; Z^* и h^* – эффективный заряд ядра и эффективное главное квантовое число соответственно; r – размерные характеристики связи.

Для свободного электрона $P = P_e = Wr$, где $W = 0,510034 \text{ МэВ} = 0,81872 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

В качестве размерной характеристики была использована величина классического радиуса электрона $r = 2,81794 \cdot 10^{-15} \text{ м}$, и поэтому $P_e = 2,30712 \cdot 10^{-28} \text{ Дж} \cdot \text{м}$.

Акт квантового действия

Формализм уравнений (10)–(12) не является принципиально новым. Еще в 1924 г. по эффекту Комптона было получено уравнение

$$\frac{1}{hv'} = \frac{1}{hv} + \frac{1 - \cos \theta}{mc^2}. \quad (14)$$

Здесь hv' – энергия рассеянного фотона; hv – энергия падающего фотона; mc^2 – собственная энергия электрона; θ – угол рассеяния. При этом энергия фотонов уменьшается на величину, которую получил дополнительно электрон. Так происходит акт квантового действия, результатом которого является перераспределение энергии между корпускулярными и волновыми свойствами взаимодействующих систем.

Еще проще, если акт действия имеет место при взаимодействии пары одноименных частиц. При взаимодействии по градиенту потенциала (корпускулярный механизм) результирующая энергия в этом варианте $W_k = \frac{W}{2}$. Если процесс идет против градиента (волновое движение), то суммарная энергия $W_0 = 2W$. Соотношение между ними $\frac{W_0}{W_k} = 4$.

Электрический ток – это движение электронов по градиенту потенциала. Если предположить, что создаваемое им магнитное поле – это волновой процесс, то соотношение электрической и магнитной постоянных должно содержать эту цифру 4, что подтверждается в следующем эмпирическом уравнении:

$$h = \left(\frac{4 + 2\alpha}{2\pi} \right)^2 P_e \frac{\varepsilon}{\mu}. \quad (15)$$

Здесь ε – электрическая постоянная; μ – магнитная постоянная; h – постоянная Планка; α – постоянная тонкой структуры – параметр, характеризующий взаимодействия квантованных электронно-позитронного и электромагнитного полей. Число π определяется соотношением между вращательным движением (длина окружности) и поступательным движением (длина диаметра).

Относительная погрешность расчетов по этому уравнению составляет около 0,06 %.

Коэффициент пропорциональности в уравнении (15) имеет размерность скорости (м/с) для соотношения (Ф/Гн), т. е. таким образом характеризуется скоростью перераспределения энергий в системе «частица – волна».

Поэтому акт квантового действия, выраженный через постоянную Планка, сводится к равновесно-обменному перераспределению энергии между корпускулярными и волновыми процессами.

Обобщая формализм уравнений (10), (15) на все другие взаимодействия, происходящие по градиенту потенциала, можно сделать вывод, что в этих случаях идут корпускулярные процессы, а волновой дуализм соответствует взаимодействиям против градиента потенциала.

Угол электронной намотки

Известно, что частица может иметь три основных вида движения: поступательное, вращательное и колебательное. Но квантовая механика вопрос о траектории электрона не рассматривает, так как можно говорить лишь о вероятности нахождения его в данной точке пространства.

Но электрон движется, и если это поступательное движение идет по градиенту потенциала, то оно может соответствовать корпускулярному процессу, а вращательное движение – волновому. Соотношение их актов перераспределения энергии зависит от величин исходных энергетических критериев подсистем. При квантовых переходах это могут быть орбитальные энергии связи соответствующих уровней.

Таким образом, основными параметрами квантовых переходов являются:

1. Энергия электромагнитной волны квантового перехода согласно уравнению Планка $E = hv$, где v – частота электромагнитной волны. Так в квантовых переходах проявляет себя колебательное движение, поскольку сама электромагнитная волна есть процесс распространения соответствующих колебаний.

2. Разность энергий связи электронов на разных энергетических уровнях перехода $\Delta W = W_2 - W_1$.

3. Результирующая энергия их корпускулярного взаимодействия

$$\frac{1}{W_k} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}. \quad (16)$$

Рассмотрим некоторые важные в данном случае макропроцессы. Тутовый шелкопряд наматывает естественную (органическую) шелковую нить только под определенным углом вращения. В космонавтике на металлический цилиндр космического корабля

наматывают целлюлозно-вискозную нить по специальной технологии и, что важно, под тем же углом намотки, что и у тутового шелкопряда. Получается наиболее прочный, технологически более качественный и более легкий аппарат [10, 11]. Можно говорить и о других примерах такого явления.

Этот угол (в основном применительно к органическим системам) получил название геодезического угла: $\varphi_0 = 4,73^\circ = 54^\circ 44'$.

В общем случае угол намотки θ – это угол между геодезической линией и вектором вращательно движения. Геодезическая линия – это кратчайшее расстояние между двумя точками в геометрической фигуре вращения. Кстати, планеты вращаются вокруг солнца тоже по геодезической линии. Для пяти планет солнечной системы угол между осью вращения и орбитой равен $62...66,5^\circ$. Земное θ , учитывающее, видимо, и влияние Луны, составляет $66^\circ 33'$. Такая же величина θ имеется у Солнца. В астрономических терминах: наклонение эклиптики Солнца и наклонение экватора Земли к орбите численно одинаковы и равны $22^\circ 27'$. Не в этом ли причина особой эффективности солнечного воздействия именно на земные биофизические процессы?

Основными элементами органических материалов являются азот, кислород, водород и, главное, углерод. Углерод – специфический элемент, способный к более легкой гибридизации атомных орбиталей с квантовым переходом $2s-2p$, поэтому при повышении температуры и давления в органических

материалах создаются условия для такой гибридизации атомов углерода, что, по-видимому, и происходит при технологии намотки в космических аппаратах. А в тутовом шелкопряде, как и во многих других природных процессах, идут соответствующие ферментативные реакции, на которых мы еще учимся, как надо работать.

Для расчета θ и φ_0 используем формализм комптоновского уравнения (14), модифицируя его применительно к квантовым переходам:

$$\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{W_k K} = \frac{1 - \cos\theta}{\Delta W}. \quad (17)$$

По этому уравнению разность энергий волнового и корпускулярного процессов численно равна разности энергий связи электронов на соответствующих орбиталях, но при выполнении принципов сложения (в данном случае вычитания) обратных величин этих параметров и с учетом квантовой геометрии переходов. Это и есть в соответствии с законом сохранения энергии процесс перераспределения ее при акте квантового действия. Угол θ – это угловой вектор движения электрона, который квантуется целым числом (K) через квадрат тангенса этого угла: $\text{tg}^2\varphi_0 = 2$; $\text{tg}^2 60^\circ = 3$; $\text{tg}^2 45^\circ = 1$.

Расчеты по уравнению (17) приведены в табл. 2 и 3. При этом значения угла θ в основном коррелируют с величиной $\varphi = \frac{h\nu}{W_k}$ по табл. 3.

Таблица 2. Энергии квантовых переходов

Атом	Переход	W_1 , эВ	W_2 , эВ	ΔW , Дж	W_k , Дж	λ (А°) по [12]	$h\nu$, Дж
C (IV)	$2s-2p$	19,201	11,792	11,871	11,705	1549	12,824
N (V)	$2s-2p$	25,724	15,445	16,469	15,462	1238	16,046
O (VI)	$2s-2p$	33,859	17,195	26,699	18,267	1031	19,267
Al (III)	$3s-3p$	10,706	5,7130	7,9997	5,9886	1854	10,7145
Si (IV)	$3s-3p$	14,690	8,0848	10,583	8,3554	1393	14,260
C (III)	$2s^2-2s2p$	19,201·2	19,201 + 11,792	11,871	27,480	977	20,332
N (IV)	$2s^2-2s2p$	25,724·2	25,724 + 15,445	16,469	36,638	765	25,967
Si (III)	$3s^2-3s3p$	14,690·2	14,690 + 8,0848	10,583	20,557	1206	16,4715
Al (II)	$3s^2-3s3p$	10,706·2	10,706 + 5,7130	7,9997	14,889	1670	11,895

Таблица 3. Квантование геометрии структурных переходов

Атом	Переход	$\varphi = \frac{h\nu}{W_k}$	$\langle\varphi\rangle$	K	θ°	$\langle\theta^\circ\rangle$	$\langle\frac{4}{3}\theta^\circ\rangle$	Функции квадрата тангенса (k)
C (IV)	$2s-2p$	1,0956	60,9°	2	54,45	60,02	–	$\text{tg}^2\varphi_0 = 2$
N (V)	$2s-2p$	1,0377		2	59,67			
O (VI)	$2s-2p$	1,0547		2	65,93			
Al (III)	$3s-3p$	1,7951	$\varphi_0^\circ + 45,47^\circ = 100,2^\circ$	3 = 2 + 1	45,45	46,2	61,6	$\text{tg}^2 60^\circ = 3$
Si (IV)	$3s-3p$	1,7067		3 = 2 + 1	47,02			
C (III)	$2s^2-2s2p$	0,7399	43,1°	1	31,97	31,7	42,27	$\text{tg}^2 45^\circ = 1$
N (IV)	$2s^2-2s2p$	0,7087		1	35,38			
Si (III)	$3s^2-3s3p$	0,8013		1	29,27			
Al (II)	$3s^2-3s3p$	0,7589		1	30,17			

В работах [13–15] используются понятия разрушающего напряжения при растяжении пластика на шаг его намотки: σ_α – осевое, σ_β – окружное напряжения, которые заменяются пропорциональной им

величиной N_α – осевое «усилие» и N_β – окружное «усилие». При этом выполняется уравнение

$$\frac{\sigma_\beta}{\sigma_\alpha} = \frac{N_\beta}{N_\alpha} = \text{tg}^2\varphi_0 = 2. \quad (18)$$

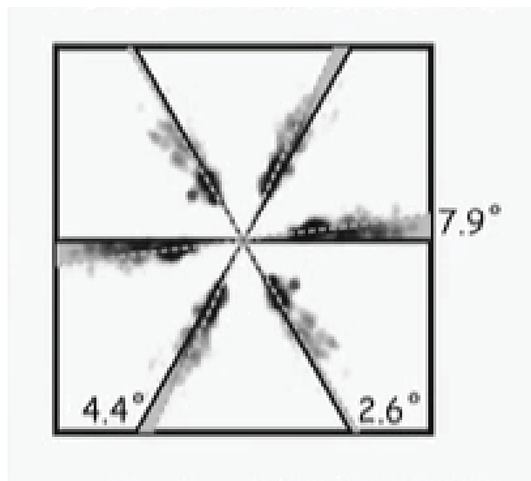
«Это условие позволяет получать равнонапряженную систему нитей с минимальной массой изделия» [16].

Квантовые функции квадрата тангенса $k = 1, 2, 3$ численно определяют соотношения двух катетов треугольника, значения которых через осевые и окружные напряжения характеризуют энергетические зависимости в системе с квантовыми и волновыми процессами.

Из табл. 3 видно, что квантовые переходы типа $2s-2p$ для атома углерода в отличие от всех других элементов не сопровождаются изменением геодезического угла и коэффициента k . Очевидно, это свойство предопределяет уникальные особенности влияния геодезического угла намотки на стабильность биосистем.

Кроме того, во всех переходах (кроме $2s-2p$) выполняется соотношение $\varphi \approx \frac{4}{3}\theta$, что свидетельствует о том, что такой коэффициент в основном компенсирует структурные особенности более сложных переходов.

Некоторая разница между значениями углов φ и θ или φ и $\frac{4}{3}\theta$, очевидно, определяется эффектом рассеяния частиц вокруг основных координатных осей. Аналогично, при конформации клеточных структур частицы статистически концентрируются вдоль координатных осей гексагонов с отклонениями на $2,6; 4,4$ и $7,9^\circ$ (рисунок).



Статистическое распределение числа клеток вдоль координатных осей [17]

Среднее число таких отклонений, равное $4,97$, примерно соответствует разности $60^\circ - \varphi_0 = 5,27^\circ$.

Динамика гексагонального формирования клеточных систем находится в соответствии с установленным [18] условием примерного равенства пространственно-энергетических характеристик подсистем по всем линиям связи. Этому способствует и тот факт, что биосистемы, имеющие в своих структурах элементы второго периода, дают угловой вектор намотки (θ), равный 60° .

Выводы

1. Два принципа сложения энергетических характеристик структурных взаимодействий можно трансформировать на процессы корпускулярно-волнового дуализма.

2. Предполагается, что при вращательно-поступательном движении электрона происходит перераспределение энергий в системе «частица – волна», что проявляется через угловой вектор такого движения (угол намотки).

3. Полученные зависимости дают возможность с единых позиций рассматривать разнородные по природе и по масштабам многие структурно-динамические процессы. Например, характеристика спин-орбитального взаимодействия – постоянная тонкой структуры $\alpha = \frac{r}{\lambda}$, где r – классический радиус электрона, а λ – его комптоновская длина волны.

Формально, но аналогично: сила взаимодействия двух длинных проводников с током пропорционально отношению $\frac{l}{2\pi r}$, где l – длина проводников, а r – расстояние между ними.

4. В этих примерах, как и во многих других, данный подход позволяет оценивать структурные взаимодействия исходя из соотношений корпускулярных и волновых пространственно-энергетических параметров в каждом акте действия.

5. В материаловедении и в физико-химических исследованиях, рассчитывая угол электронной намотки в некоторых структурах, можно делать конкретные рекомендации по инновационным технологиям, например, при изготовлении двигателей (в машиностроении) или при намотке на основу льна-долгунца (в сельском хозяйстве).

6. Разность фаз электрических и магнитных колебаний в электромагнитной волне составляет $\frac{\pi}{2}$. Введем в коэффициент уравнения (15) величину $\left(\frac{2}{\pi}\right)^2$,

получаем уравнение для постоянной Планка с точностью, близкой к точности самих исходных данных:

$$h = \left(\frac{4}{\pi^2} + a\right) P_e \frac{\varepsilon}{\mu},$$

где $a = 0,0023293$ – экспериментальная квантовая поправка к спиновому g_s – фактору электрона.

Библиографические ссылки

1. *Мэрисон Дж. Б.* Общая физика с биологическими примерами. – М. : Высш. шк., 1986. – 623 с.
2. *Рубин А. Б.* Биофизика. – Кн. 1. Теоретическая биофизика. – М. : Высш. шк., 1987. – 319 с.
3. *Блохинцев Д. И.* Основы квантовой механики. – М. : Высш. шк., 1961. – 512 с.
4. *Korablev G. A., Zaikov G. E.* Quantum and Wave Characteristics of Spatial Energy Interactions. Bioscience Methodologies in Physical Chemistry // Apple Academic Press, 2013. – Pp. 130–143.

5. Эйринг Г., Уолтер Дж., Кимбал Дж. Квантовая химия // М. : и. л., 1948. – 528 с.

6. Korablev G. A. Spatial-Energy Principles of Complex Structures Formation. – Netherlands : Brill Academic Publishers and VSP, 2005. – 426 p. (Monograph).

7. Fischer C. F. // Atomic Data. – 1972. – No. 4. – Pp. 301–399.

8. Waber J. T., Cromer D. T. // Phys. – 1965. – V. 42, no. 12. – Pp. 4116–4123.

9. Clementi E., Raimondi D. L. // Phys. – 1963. – V. 38, no. 11. – Pp. 2686–2689 ; J. Chem. Phys. – 1967. – V. 47, no. 4. – Pp. 1300–1307.

10. Кодолов В. И. Полимерные композиции и технология изготовления из них двигателей летательных аппаратов. – Ижевский механический институт, 1992. – 200 с.

11. Пидгайный Ю. М., Морозова В. М., Дудко В. А. Методика расчета характеристик геодезической намотки об-

Получено 16.03.2017

лочек тел вращения // Механика полимеров. – 1967. – № 6. – С. 1096–1104.

12. Аллен К. У. Астрофизические величины. – М. : Мир, 1977. – 446 с.

13. Кодолов В. И. Указ. соч.

14. Пидгайный Ю. М., Морозова В. М., Дудко В. А. Указ. соч.

15. Аюшеев Т. Ю. Геометрические вопросы адаптивной технологии изготовления конструкций намоткой из волоконистых композиционных материалов. – Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2005. – 212 с.

16. Кодолов В. И. Указ. соч.

17. Мозер Эдвард. Нобелевская лекция по физиологии: 11.03.2015 г. / Телеканал «Наука».

18. Кораблев Г. А., Васильев Ю. Г., Заиков Г. Е. Гексагональные структуры в наносистемах // Химическая физика и мезоскопия. – 2015. – Т. 17, № 3. – С. 424–429.

УДК 621.833.38

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-60-64

А. С. Кузнецов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. М. Санников, Институт механики ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОД РАСЧЕТА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННОЙ НИЗКОСКОРОСТНОЙ СПИРОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Введение

Решение задач оценки нагруженности и прочности с учетом упругого характера контактного взаимодействия стало во многом привычным делом в теории и практике зубчатых передач [1–5]. Традиционными инструментами решения задачи является метод конечных элементов (МКЭ) и соответствующие реализующие его пакеты. Можно указать на следующие взаимосвязанные проблемы применения МКЭ для анализа нагруженных зубчатых передач:

– возрастание погрешности вычислений для случаев оценки напряжений в основаниях зубьев при относительно неплавных сопряжениях между боковыми поверхностями зубьев и их впадинами;

– резкое возрастание вычислительных сложностей (требований к вычислительным ресурсам, накопление вычислительной погрешности от округлений при многочисленных операциях, обеспечение сходимости) для случая многопарного контакта.

Именно к этим случаям следует отнести оценку напряжений в основаниях зубьев многопарных спироидных передач. В передачах тяжело нагруженных низкоскоростных редукторов расчетные значения даже равномерно распределенных вдоль линий сопряженного контакта максимальных контактных напряжений достигают 1500...2000 МПа. Закономерны опасения за потерю контактной и (или) изгибной прочности зубьев при концентрации напряжений на тех или иных участках в результате дейст-

вия погрешностей и деформаций. Однако такие передачи успешно работают. Очевидно, что этому способствует быстрее выравнивание нагрузок, действующих на зубья, и снижение соответствующих напряжений. Практика испытаний и эксплуатации подтверждает это предположение: уже после первых циклов тяжелого нагружения можно наблюдать пластически деформированные участки зубьев. Таким образом, весьма актуален учет этого фактора при оценке прочности многопарных тяжело нагруженных спироидных передач.

В упругопластической постановке задачи указанные выше проблемы применения МКЭ обостряются в еще большей степени. По этой причине нами разработан итерационный алгоритм расчета упруго-упругопластически нагруженного контактов пространственной многопарной передачи, основные аспекты которого отражены в настоящей статье. Во многом наш алгоритм перекликается с алгоритмом, разработанным в [6], но в нем больше внимания уделено процессу изнашивания поверхности зуба как наиболее влияющему на эволюцию зацепления. Для рассматриваемых в настоящей работе условий нагружения наибольшее влияние оказывает упругопластическая деформация, поэтому данный вопрос рассмотрен более подробно.

Модель упругопластически нагруженного контакта

Мы рассматриваем в первую очередь такой уровень нагружения передачи и такое устанавливаю-