

КОНЦЕПЦИЯ СОВМЕЩЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО НЕЙТРОННО-ИОННОЙ ФИЗИКЕ МАТЕРИАЛОВ. I. РАСПЫЛЕНИЕ

Е.А.Красиков, П.А.Платонов,
Н.В.Плешивцев, Н.Н.Семашко

Материаловедение для реакторов управляемого термоядерного синтеза (УТС) не только концентрирует в себе проблемы ядерной энергетики, но и выдвигает ряд принципиально новых задач, связанных с качественно отличными, экстремальными условиями работы материалов, конструкций и систем.

Специфика воздействия нейтронного облучения и излучения плазмы на изменение структуры материалов в реакторах УТС, помимо ужесточения нейтронного спектра, состоит в одновременности генерации радиационных дефектов и интенсивной имплантации газовых и металлических примесей. Очевидно, что здесь всё взаимосвязано: наличие примесей может радикально изменить закономерности радиационного повреждения, а судьба инжектируемых из плазмы примесей зависит от характеристик эволюционирующих радиационных дефектов и формирующихся из них структур.

До сих пор, однако, принято разделение радиационных эффектов на объемные (поврежденные нейтронами) и поверхностные (воздействие плазмы), что не может дать адекватного ответа на вопрос о механизмах нейтронно-ионного повреждения и о работоспособности обращенных к плазме материалов в натуральных условиях при комплексном воздействии. Не случайно осуществлявшиеся до сих пор одно-двухфакторные имитации оказались малопродуктивными.

Для получения фундаментальной информации по нейтронно-ионной физике материалов, выявления возможных синергетических эффектов, связанных с многофакторностью реальных условий воздействия, и радикального повышения результативности исследований механизмов повреждения кандидатных материалов реакторов УТС, а также их отбраковки на ранних стадиях деградации необходимо воздействие нейтронного и плазменного факторов, т.е. поместить в ядерный реактор генератор плазмы и создать таким образом нейтронно-ионный облучательный комплекс.

В настоящее время применительно к экспериментальным возможностям исследовательского реактора ИР-8 разработан радиационно-стойкий ионно-плазменный источник, адаптированный к геометрии реакторного канала диаметром 50 мм. Спроектированы вакуумная и электрическая системы нейтронно-ионного канала-прототипа. Сформулирована концепция послереакторного исследования состояния и свойств

микрообразцов модельных и кандидатных материалов реакторов УТС. Разработан и изготовлен макет нейтронно-плазменного устройства на основе тлеющего разряда с шестью независимыми катодами-образцами. В этом устройстве будут промоделированы процессы физического и химического распыления с целью обоснования конструкции нейтронно-ионного прибора.

В данном сообщении рассмотрены следующие вопросы. Проекты реакторов УТС. Проблемы выбора и создания материалов для защитных покрытий первой стенки и диверторных пластин международного термоядерного экспериментального реактора-токамака (ИТЭР). Кандидатный материал - углеситалл УСБ-15. Распыление металлов быстрыми нейтронами. Синергетические эффекты при взаимодействии плазма-стенка.

Проекты УТР и проблема выбора и создания материалов для защитных экранов первой стенки и диверторных пластин ИТЭР

Развивая предложение О.А.Лаврентьева о возможности осуществления на Земле термоядерных реакций, протекающих на Солнце, И.Е.Тамм и А.Д.Сахаров в 1950 г. предложили принцип магнитной термоизоляции плазмы и модель магнитного термоядерного реактора (МТР) в виде тороидальной камеры, окружённой магнитным полем, для получения ядерного горючего для атомных электростанций [1,2].

И.В.Курчатов в 1956 г. В Харуэлле призвал к объединению усилий ученых всех стран для решения проблемы мирного использования термоядерной энергии.

Л.А.Арцимович с сотрудниками в докладе CN-24/B-1 на Третьей конференции по исследованиям в области физики плазмы и УТР (Новосибирск), 1-6 августа 1968 г.) показали, что в токамаках Т-3 и ТМ-3 с большим радиусом тора 100 см и малым радиусом, равным соответственно 19 и 8 см, можно получить плазму с концентрацией частиц до 10^{14}см^{-3} , температурой электронов 1 кэВ и ионов 0,5 кэВ и временем удержания 20 мс. Эти результаты, полученные в СССР, привели к строительству около 300 токамаков во многих странах мира и разработке ряда проектов ТЯР: Т-20, ОТР, УВМАК-1, -2, ИНТОР, ИТЭР. Некоторые характеристики некоторых из них приведены в табл. 1 [2-6].

Таблица 1

Параметры	МТР	ОТР	ИНТОР	ИТЭР
1	2	3	4	5
Большой радиус тора, м	12	5,6	5,2	6
Малый радиус тора, м	9	1,1	1,2	2
Средняя плотность плазмы, м^{-3}	$3 \cdot 10^{20}$	$1,4 \cdot 10^{20}$	$1,4 \cdot 10^{20}$	$1,2 \cdot 10^{20}$

1	2	3	4	5
Ток плазмы, МА		5,1	6,4	19-22
Средняя температура плазмы, кэВ	100	10	10	10-20
Длительность импульса, с	непрер.	600	100-200	400-2500
Нейтронная нагрузка, МВт/м ²	1,5	1,5	1,3	0,7-1,0
Термоядерная мощность, МВт	880	490	620	750-1080
Суммарная ядерная мощность, МВт		1000	620	750-1080
Производство плутония, кг/год		200		
Производство трития, кг/год	36,5			
Производство урана-233, кг/год	2920			
Потребление трития, кг/год		19	7	14-16
Нагрев плазмы пучками D ⁰ , МВт			75	75

Потоки ионов и нейтронов на первую стенку (ПС) и диверторные пластины (ДП) ИТЭР для двух фаз работы: физической (6 лет) и технологической (10-12 лет), а также другие параметры работы реактора и кандидатные материалы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Фазы работы	Физическая		Технологическая	
	ПС	ДП	ПС	ДП
1	2	3	4	5
Максимальный поток DT-ионов, 10 ²⁰ /м ² ·с	1	4000	1	4000
Энергия ионов, эВ	10-100	50-100	10-100	60-200
Средняя нейтронная нагрузка, МВт/м ²	1	0,5	0,8	0,4
Тепловой поток: максимальный, МВт/м ²	0,6	15-30	0,6	15-30
средний, МВт/м ²	0,15	0,6	0,15	0,6
Число импульсов, 10 ³	10	10	20-50	20-50
Общее время горения реакции, ч	400	400	1·10 ⁴	3·10 ⁴

1	2	3	4	5
Максимальная длительность импульса, с	200	200	200	200
Максимальное число нейтронных повреждений, число смещений на атом	0,7	0,3	12-36	5-15
Материалы: рекомендация	СС-комп.	СС-комп.	W	W
альтернативный	Be	Be	C	C, Be
Максим. температура, °С	1800	1000	500	1500
Конструкционный материал	316	Mo спл.	316	Nb спл.
		Nb спл.		Mo спл.
Охлаждение	Вода, 60°С		Вода, 60°С	

Около 750 м² поверхности ПС интегрируется с бланкетом для воспроизводства трития в виде 96 охлаждаемых сегментов. Около 200 м² поверхности ДП разбивается на 64 охлаждаемых сегмента. Для предотвращения загрязнения плазмы, оплавления материала и его термических разрушений, вызываемых срывами плазмы, пучками нейтралов и топливными пулями. Ожидается до 100 срывов плазмы с плотностью энергии 2 МДж/м² длительностью 0,1-3 мс, а также потоки убегающих электронов с энергией до 300 МэВ и плотностью потока энергии до 30 Мдж/м². На ДП плотность потоков тепла в максимуме распределения достигнет 30 Мвт/м², а от убегающих электронов плотность потока энергии в максимуме распределения - до 20 МДж/м².

В качестве материала защитного экрана ПС выбран углерод-углеродный волоконный композит из-за его уникальной стойкости к тепловым ударам при работе в токамаке и при испытаниях. Возможно, этот материал будет покрыт бериллием или бором, чтобы уменьшить радиационно-ускоренную сублимацию графитовых волокон, захват трития и примесей обезгаживания камеры, окисление воздухом или при испарении.

Срок службы экранов ПС с начальной толщиной 2-3 см определяется главным образом разрушением, создаваемым эрозией и нейтронными повреждениями, вызывающими набухание и охрупчивание материала.

К материалам УТР предъявляются весьма высокие плазмофизические, вакуумные, теплотехнические, конструкционные и технологические требования, обусловленные экстремально высокими потоками частиц, излучений, тепла, механических, электромагнитных и других воздействий на рабочие элементы термоядерного реактора [7-18].

Первое принципиально важное требование к материалам, ограничивающим горячую плазму, определяющее "летальные" относительные концентрации примесных атомов в плазме, получено в работах [8,9]:

$$C(Z) = n^*/n_e = 2,34 / Z^{1,16}, \quad (1)$$

где C - относительная концентрация примесных атомов с номером Z ,
 n^* и n_e - концентрации примесных атомов и электронов плазмы.

Это соотношение получено для температуры электронов, равной температуре ионов в диапазоне 10-40 кэВ для материалов с $Z = 6-80$ для условия, что суммарная мощность радиационных потерь термоядерной плазмы превысит мощность потока альфа-частиц, выделяющихся в результате D - T реакции. Для молибдена и вольфрама "летальные" концентрации соответственно равны 0,6 и 0,2 %...

Основным поставщиком загрязнений при горении ядерной реакции без срывов является ионное распыление материала первой стенки и ее защитного экрана. В этих условиях, как показали Ф.Л.Вук и др. [10], термоядерная реакция будет гореть без применения диверторного устройства при выполнении для всех примесных атомов неравенства:

$$\sum_i \bar{S}_i(E) Z_i^{1,67 \div 2} \leq 2,34. \quad (2)$$

Известные материалы не могут удовлетворить этому условию. Пожалуй, только новый углеродосодержащий материал, углесталл УСБ-15, изобретенный Г.М.Волковым с сотрудниками, на пределе своих возможностей и условий облучения может выдержать вышеуказанное требование. Но для надежности в ИТЭР будет использоваться дивертор с одним или двумя нулями магнитного поля, огибающего первую стенку, на входе в дивертор, в котором будут поглощаться и откачиваться примесные атомы и гелиевая "зола".

Вторая проблема, вызываемая бомбардировкой ПС и ДП ионами рабочих газов и примесных атомов, связана с большой скоростью распыления ПС и ДП или их экранов. Замена или регенерация их требует остановки реактора. Скорость распыления d , см/год горения реакции, материала экранов ПС и ДП ионами и атомами D, E, He и примесными атомами можно рассчитать по формуле [11]:

$$d = \frac{5,23 \cdot 10^{-17} \cdot A}{\rho \cdot \alpha} (\bar{S}_D \cdot q_D + \bar{S}_T \cdot q_T + \bar{S}_{He} \cdot q_{He}) (1 + \beta \bar{S}_s(E)), \quad (3)$$

где A и ρ - атомная масса и плотность материала ПС, \bar{S} - средние по энергетическому спектру коэффициенты распыления и q - потоки быстрых ионов и атомов В, Т и He, \bar{S}_s - средний коэффициент распыления ионами материала ПС, β - коэффициент, дающий долю числа распыленных атомов, которые термализовались в плазме, и возвратившихся на ПС, α - коэффициент, учитывающий ослабление потока ионов на ПС за счет дивертора.

В работах [11 и 25] проведены расчеты для 16 кандидатных материалов ПС ОТР для условий $q_D = q_T = 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\alpha = 1$ и $\beta = 0,1$. В табл. 3

приведены данные для четырех наиболее удовлетворяющих требованию (2) материалов.

Таблица 3

Материал	\bar{S}_D , ат/ион	\bar{S}_T , ат/ион	\bar{S}_{He} , ат/ион	$\bar{S} \cdot Z^2$	d, см/год
УСБ-15	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-2}$	0,13	7,2	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Be	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,54	13,2	$6,4 \cdot 10^{-2}$
B	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,41	15,2	$5,5 \cdot 10^{-2}$
W	$8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	79	$2,7 \cdot 10^{-2}$

Как видно из табл. 3, углеситалл по главному плазмо-физическому требованию существенно превосходит все предлагаемые кандидатные материалы для ПС и ДП. Рассмотрим другие свойства УСБ-15.

Кандидатный материал для первой стенки ИТЭР УСБ-15

Углеситалл обладает рядом уникальных физико-химических, механических, трибологических и тромборезистивных свойств [18-34].

Рабочая температура УСБ-15 в нейтральной и восстановительной средах равна 2000°C , тогда как температура плавления Be 1284°C .

Зависимость $S(E)$ для УСБ-15 представлена в табл. 4 [28].

Таблица 4

Энергия ионов, кэВ/атом	Температура образца, $^\circ\text{C}$	Коэффициент распыления, атом/ион
0,25	250	$0,025 \pm 0,004$
0,70	300	$0,027 \pm 0,003$
1,50	380	$0,017 \pm 0,003$
3,50	150	$0,013 \pm 0,002$
10,00	200	$0,0086 \pm 0,002$

Зависимость от температуры образца УСБ-15 приведена в табл.5.

Таблица 5

T, °C	E, кэВ/ат.	S, ат./ион	T, °C	E, кэВ/ат.	S, ат./ион
150	3,5	0,013±0,002	500	4,0	0,023±0,004
300	4,0	0,012±0,002	550	3,5	0,025±0,004
400	4,0	0,022±0,004	600	4,0	0,018±0,003
450	4,0	0,021±0,004			

В диапазоне температур 400-550°С имеется пологий максимум коэффициента распыления углеситалла, который в два раза больше, чем при 150° С. Синергетический эффект химического и физического механизмов ионного распыления для ионов дейтерия существенно меньше у УСБ-15, чем у чистого графита, для которого в области 200-700°С коэффициент распыления равен $7,6 \cdot 10^{-2}$ ат. С/ион D, а при 100°С - $9 \cdot 10^{-2}$ ат/ион.

Для условий облучения ПС и ДП в ИТЭР (см. табл.2), экстраполируя данные табл.4 и 5 для энергии (максимальной) 100 эВ, получим значения коэффициентов распыления ионами D⁺, T⁺, He⁺ и C⁺, равные соответственно: 0,01; 0,015; 0,02, и 0,6 ат.С/ион. Используя данные табл.2 и формулу (3), получим скорость распыления экрана ПС из УСБ-15 $d = 0,045$ см/год. Скорость распыления экранов ДП из УСБ-15 составит 17,5 см/год. Тогда как по расчетам Дж.Брукса и группы ИТЭР [6,35] максимальная скорость распыления экрана из гранита для ДП с учетом химического и физического распыления составит 557 - 1000 см/год. С учетом перенапыления чистая скорость эрозии экранов из графита и бериллия будет соответственно равной 20 и 80 см/год. При использовании качания сепаратрисы магнитного поля в диверторе срок непрерывной работы экранов ДП и реактора увеличится с 7 до 23 дней. Поэтому экран ДП из графита обеспечит работу ИТЭР только на физической фазе исследований реактора.

Предпочтение углеситаллу следует отдать не только по плазменно-физическому параметру, но также вследствие его высокотемпературной прочности и термоциклической стойкости. Предел прочности на разрыв углеситалла с увеличением температуры от 20 до 1600°С возрастает от 87-123 МПа до 150±40 МПа, электрографита от 2 до 22 МПа, пиролитического углерода от 3 до 120 МПа при 2000°С. Тогда как у молибдена он уменьшается от 550 до 35 МПа при 1600°С. Предел прочности на изгиб УСБ-15 в диапазоне температур 20-2000°С увеличивается от 180 до 850 МПа, а на сжатие - от 380 до 550 МПа. У названных выше марок графитов они равны соответственно 19/23, 90/95 МПа на изгиб и 16/35 и 63 МПа на сжатие [23].

Термоциклическая стойкость углеситалла исследовалась при воздействии пучком электронов с энергией 17 кэВ и плотностью потока энергии до 1700 Вт/см² при длительности импульсов от 2 до 100 с [24], а также при энергии электронов 800 кэВ и плотности потока энергии до 200 МДж/м² [32]. В первых экспериментах использовались толстые слои УСБ-15 (5 мм) на графите МПГ-8 толщиной 10 мм и тонкие слои (0,4 мм) углеситалла на молибден-ванадиевом сплаве марки 4604. Толстые слои при длительности импульса 100 с и 840 Вт/см² без охлаждения подложки выдержали 300 импульсов без образования микротрещин и отслаивания углеситалла от подложки. При плотности мощности и энергии 1350 Вт/см² и 1,35·10⁵ Дж/см² после трех импульсов длительностью по 100 с на поверхности углеситалла возникали микротрещины шириной до 25 мкм. При длительности импульса 2 с и значениях 1700 Вт/см² и 3,4·10³ Дж/см² образования микротрещин и отслоений не наблюдалось.

Тонкие слои углеситалла на сплаве 4604 начинали оплавляться при средней плотности мощности потока электронов 400-460 Вт/см² и энергии (4-4,6)·10⁴ Дж/см². Пучок электронов перекрывал всю поверхность образца 14x21 мм² толщиной 9,5 мм, который не охлаждался. После 22 циклов нагрева импульсами по 100 с слой углеситалла по краям образца изогнулся и принял форму оплавленного молибдена. Отслоения и растрескивания слоя углеситалла не наблюдалось. Когда сечение пучка электронов ограничивалось вольфрамовой диафрагмой 6,3 x 8 мм² при средней плотности потока энергии 1000 Дж/см², после 10-20 термоциклов с длительностью теплового импульса 100 с наблюдалось расплавление подложки. На боковой поверхности образца образовалась капля расплавленного молибдена. Она продавila канал ниже слоя углеситалла высотой 240-300 мкм и длиной 4,6 мм. Но и в этом случае не наблюдалось отслоение и растрескивание слоя УСБ-15.

Таким образом, тонкие и толстые покрытия углеситалла на поверхности графита МПГ-8 и молибденового сплава 4604 выдерживают тепловые импульсы длительностью 100 с без охлаждения подложки с плотностью потока энергии 4-10 МДж/м², что в 6,7-16,7 раза превышает максимальный на ДП и в 26,7-66,7 раза средний поток на ПС ИТЭР на соответственно физической и технологической фазах работы реактора.

Во второй серии опытов имитировались условия воздействия тепловых потоков срывов плазмы и убегающих электронов на эрозию и разрушение графита МПГ-8 и УСБ-15 [32]. Использовался пучок релятивистских электронов с энергией 800 кэВ, током в пучке 5000 А, длительностью импульса 1,5-2 мкс и плотностью потока энергии 150-200 МДж/м². Мишень из МПГ-8 в виде стакана с наружным диаметром 53 мм, внутренним диаметром 40 мм, толщиной доньшка 15 мм или в форме диска толщиной 7-8 мм разрушалась после 6-8 импульсов пучка электронов. Трубчатый пучок электронов прорезал кольцевую канавку диа-

метрами 20/28 мм на глубину 5-6 мм, после чего оставшаяся часть мишени обламывалась, образуя сквозное отверстие.

Мишени из УСБ-15 в виде дисков диаметром 44 мм, толщиной 4-5 мм нанесенного УСБ-15 на МПГ-8 толщиной 10 мм после 15-18 импульсов пучка покрывались сетью трещин и прорезались пучком на глубину 4-4,5 мм. При энергии пучка 8 кДж удельные тепловые нагрузки в области прорезанного кольца составили 10^{12} Вт/м² и 200 МДж/м². Как отмечалось выше, ожидаемая плотность потока тепла в максимуме распределения от убежавших электронов в ИТЭР не превысит 20 МДж/м².

Радиационная размерная нестабильность УСБ-15 исследовалась в атомном реакторе типа ВВР-М на образцах 3x4x20 мм³ при температуре 130-500°С. При флюенсе $3,3 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² и энергии нейтронов выше 0,18 МэВ при 130-150°С наблюдался рост размеров на 0,5%. При 400-500°С и флюенсах $4,5 \cdot 10^{20}$ и $6 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² наблюдалась усадка размеров образцов соответственно на 0,5 и 1,6%. Предварительная термообработка УСБ-15 при 2000 и 2400°С снизила усадку с 1,6 до 0,55% и 0,50% соответственно [23]. Замена естественного бора на бор, обогащенный изотопом В-11, увеличила радиационную стойкость углесталла марки УСБ-15И.

Итак, приведенные экспериментальные данные позволяют считать углесталл марок УСБ-15 или УСБ-15И наиболее перспективным материалом для защитных экранов первой стенки и диверторных пластин ИТЭР.

Распыление материалов быстрыми нейтронами

Более чем 30 лет изучения этого процесса дали весьма противоречивые данные [36-46]. Измеренные значения коэффициентов распыления ниобия нейтронами с энергией 14 МэВ сильно зависят от шероховатости поверхности, методов ее обработки (холодная прокатка, механическая, химическая, электрохимическая, ионная бомбардировка, отжиг в вакууме) и кристаллической структуры [38, 39, 44]. Распыление нейтронами ниобия, как правило, происходит в виде атомов. Но при шероховатости поверхности 5-10 мкм образцов холоднокатанного ниобия на коллекторе наблюдаются микрокомочки (микрокусочки, микрочастицы, “грибочки”), содержащие 10^{10} - 10^{12} атомов. Число их изменяется от 5-25 до 250-1000 на 1 см² коллектора. В этих условиях коэффициент распыления достигал значения 0,25 ат./нейтрон. Однако в большинстве исследований он оказался для ниобия и золота в пределах $5 \cdot 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-6}$ ат./нейтрон.

В исследованном диапазоне доз нейтронов с энергией 14 МэВ 10^{13} - 10^{18} нейтр./см² наблюдается линейная зависимость числа распыляемых атомов с ростом дозы нейтронов. Имеются данные о коэффициентах распыления названных металлов, равных 10^{-3} - 10^{-4} ат./нейтр.

Теория распыления П.Зигмунда [45, 46] дает формулу для расчета коэффициента распыления материалов нейтронами:

$$Y(E) \equiv S(E) = a \Lambda N \langle \sigma_n(E) \rangle v(T), \quad (4)$$

где $a = 0,06$; 1 и 2 - соответственно для распыления "назад", "вперед" по отношению направления потока нейтронов на мишень и изотропного распыления; $\sigma_n(E)$ - поперечное сечение передачи кинетической энергии от нейтрона атому твердого тела, равное нескольким единицам 10^{-8} \AA^2 ; несмотря на то, что площадь одной кристаллической ячейки равна 5 \AA^2 ; $v(T)$ - доля средней кинетической энергии, переданная в кинетическую энергию атомам мишени; N - атомная плотность материала мишени; Λ - коэффициент, зависящий от материала и энергии связи атома с поверхностью:

$$\Lambda \cong 0,042/TU_0, \text{ \AA} \text{ \AA}^2, \quad (5)$$

если N в \AA^{-3} и U_0 в эВ.

Отношение коэффициентов распыления "вперед" и "назад" равно

$$\frac{Y_f}{Y_b} \cong \left(\frac{14}{15} \gamma(0) + \frac{1}{30} \frac{\sigma_v(E) \langle T \rangle}{\langle \sigma_n(E) v(T) \rangle} \right), \quad (6)$$

где $\gamma(0)$ - коэффициент отражения энергии или эффективность распыления при падении нейтрона по нормали к поверхности; для распыления ионными пучками $\gamma(0) = 0,02 - 0,03$; $T = T_m/4$, $T_m = 4M_2E/(1+M_2)^2$ - средняя переданная атомам кинетическая энергия. Для ниобия (формула (6) дает $\frac{Y_f}{Y_b} \cong 12$, а компьютерные расчеты - 18. Расчетные значения Y_f

для золота в диапазоне энергий нейтронов 1-15 МэВ равны $(0,1-2,4)10^{-5}$ ат.А_n/нейтр., а для ниобия $(0,004-1,5)10^{-5}$ ат. N_b/нейтрон.

Авторам настоящего доклада и участникам данной конференции не известны работы, посвященные изучению совместного действия нейтронов и ионов на процесс распыления твердых веществ.

На наш взгляд, имеется большая вероятность содействующего (синергетического) эффекта от совместного действия ионов с различной массой и разными скоростями, нейтронов с широким спектром скоростей, электромагнитного излучения с большим диапазоном энергии квантов, плазменных и убегающих электронов. В настоящее время имеются исследования закономерностей химического действия некоторых ионов в зависимости от температуры облучаемого образца, ионов и электронов, плазмы с различными ионами.

Синергетические эффекты при взаимодействии плазма-стенка

Процесс распыления и его главный параметр - коэффициент распыления зависит от многих факторов, характеризующих бомбардирующий

нон, атом мишени и условия облучения [49-52]. Однако в монографиях и трудах многих конференций изучались в основном зависимости коэффициента распыления от одного из около 20 факторов или параметров.

В 1926 г. А.Гюнтершульце [49], распыляя в тлеющем разряде в водороде 22 металла и графит, открыл эффект химического распыления, им названный "электрохимическим" катодным распылением. Интерес к этому процессу химического распыления возник в начале 70-х годов в микроэлектронике и при изучении температурной зависимости коэффициента распыления графита и углеграфитовых материалов при облучении их протонами, ионами и атомами водовода. Обзоры последних работ по этому вопросу содержатся в Трудах рабочей группы по синергетическим эффектам в поверхностных явлениях, связанных с взаимодействиями плазма-стенка [53-55].

Р.Бериш применительно к термоядерному синтезу дал "рабочее" определение синергизму: "Синергизм относится к явлению, когда объединение эффекта независимых процессов значительно отличается от индивидуальных эффектов, рассматриваемых отдельно" [53]. Определения синергизма в других областях знаний к данной теме не применяются.

Многие явления, которые в прошлом рассматривались как "синергетические", таковыми не являются вследствие недостаточной исследованности. Ожидаемыми причинными действующими силами являются: химически активные (реагирующие, реактивные ионы), температура, радиационные повреждения, многочастичные потоки, модификация поверхности, внешние напряжения. Области действия: нанесение частиц, эрозия, сегрегация и диффузия.

Рассмотрим основные результаты из некоторых докладов [53-55]. Синергизм между тепловыми атомами H^0 и энергетическими ионами H^+ , D^+ , He^+ , C^+ и Ag^+ в зависимости от температуры в диапазоне 300-2000 К при взаимодействии их с графитом исследован различными авторами [54]. Химическая эрозия в виде молекул CH_3 под действием тепловых атомов водорода имеет максимум при 500 К, равный $7 \cdot 10^{-5}$ CH_3 /атом H^0 . Дополнительное воздействие ионами аргона с энергией 5 кэВ смещает максимум в область температур 700-1000 К, а его значение возрастает до $7 \cdot 10^{-5}$ CH_3 /атом H^0 , т.е. выход молекул увеличивается в 100 раз.

Химически активные ионы H^+ и C^+ с энергией 5 кэВ повышают значение коэффициента физического распыления при 300 К от соответственно $6 \cdot 10^{-3}$ и $2 \cdot 10^{-2}$ ат.С/ион до $1 \cdot 10^{-1}$ и $1,2 \cdot 10^{-1}$ ат.С/ион, т.е. в 17 и 6 раз при температуре максимума 900 К. Воздействие ионов He^+ с энергией 3 кэВ и C^+ 50 кэВ приводит к плавному росту выхода атомов от соответственно $6 \cdot 10^{-2}$ и $3,5 \cdot 10^{-1}$ ат.С/ион при 300 К до 1,0 и 3,0 ат. С/ион, т.е. в 17 и 8,6 раза при 2000 К. Ионы Ag^+ 50 кэВ при 300 К дают выход 1,5 ат.С/ион C^+ .

Этот процесс резкого увеличения выхода атомов С и молекул CH_3 , C_2 , CH_4 , CD_2H , CD_4 при дополнительной ионной бомбардировке назван радиационно-усиленной сублимацией графита. Подобный процесс происходит и при облучении графита ионами O^+ с энергией 0,3; 1 и 10 кэВ и ионами CO^+ , 7 кэВ. Выход атомов углерода плавно растет с увеличением температуры бомбардируемых образцов.

Температурная зависимость "синергетического" выхода метана из графита при плотности потока субэлектронвольтных $\text{H}^0 \sim 6 \cdot 10^{14} \text{H}^0/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ и $\text{H}^+ \sim 2 \cdot 10^{14} \text{H}^+/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ в присутствии H_2 исследован для небольших энергий ионов H^+ : 100 и 300 эВ [55]. Для тепловых H^0 наблюдался широкий максимум в области температур 600-800 К с выходом 0,05 CH_4/H^0 . При энергии H^+ и H_2^+ 300 и 100 эВ, но без H^0 зависимость выхода от температуры совпадает с аналогичной зависимостью для H^0 . Однако совместное воздействие H^0 и 100 эВ H^0 резко увеличивает выход CH_4 до значения 0,18 CH_4/H^+ при 650-750 К. А ионы H^+ с энергией 300 эВ повышают выход в максимуме до 0,39 CH_4/H^+ при 800 К, т.е. в 7,8 раза по сравнению с воздействием на графит только H^0 или только H^+ и H_2^+ .

Синергетический эффект наблюдался также на кремнии. При воздействии только химического соединения XeF_2 скорость травления составляла 5 Å/мин. Включение в этот процесс травления пучка ионов Ag^+ с энергией 450 эВ и током 2,5 мкА на участок 0,1 см² при потоке XeF_2 $2 \cdot 10^{15}$ молекул/с на участок 0,3 см² скорость травления вначале увеличилась до 67 Å /мин, затем через 200 с уменьшилась до 55 Å /мин и сохранялась на этом уровне в течение 200 с. После отключения потока газа пучок Ag^+ создавал скорость травления 3 Å /мин.

Подобные результаты получены при использовании в качестве травителя хлора, поток $7 \cdot 10^{15} \text{Cl}_2/\text{с}$ и Ag^+ , 450 эВ, 1 мкА. При бомбардировке только пучком ионов скорость травления составляла 2,4 Å /мин, а добавка хлора увеличила ее до 5,3 Å /мин.

Скорость травления кремния в зависимости от потоков газов XeF_2 и Cl_2 без пучков ионов He^+ , Ne^+ и Ar^+ с энергией 1 кэВ в диапазоне 0 - $30 \cdot 10^{15}$ молекул/с свидетельствует об увеличении скорости травления кремния при сопутствующей ионной бомбардировке на 11,5 ат/ He^+ , 20 ат/ Ne^+ и 27,4 ат/ Ar^+ при потоке XeF_2 $3 \cdot 10^{16}$ молекул/с. При том же потоке хлора добавка в скорости травления кремния ионами He^+ , Ne^+ и Ar^+ с энергией 1 кэВ составляла соответственно 0,92; 2,6 и 4,4 ат/ион.

Исследована зависимость коэффициента распыления титана ионами Ar^+ с энергией 11 кэВ в функции от отношения потока химически активных газов азота, кислорода и водорода. Когда поток ионов аргона в 10 раз превышает поток названных атомов газов, коэффициенты распыления соответственно равны 0,35; 0,45 и 0,69 ат./ион. Если же это отношение находится в пределах 10^{-2} - 10^{-1} , то коэффициент распыления для всех газов возрастает примерно до 1,4 ат./ион.

Когда железо распыляли ионами H^+ , 2 кэВ, D^+ , 2 кэВ и He^+ , 6 кэВ, то при отношении потока O_2 к потоку ионов, равном 5-10, выход атомов железа составлял соответственно $1,9 \cdot 10^{-3}$, $3,6 \cdot 10^{-3}$ и $1,3 \cdot 10^{-2}$ ат/ион. При отношении названных потоков, равном 10^{-2} , выход атомов возрос соответственно до значений $1,3 \cdot 10^{-2}$, $3,6 \cdot 10^{-2}$ и 0,15 ат./ион.

Фламм и Доннели [55] предложили механизм "ускорения травления радикалами вследствие разрушения и создания анизотропии расположения атомов на поверхности", создаваемыми радиационными повреждениями, вызванными ионами, а также механизм рекомбинации анизотропии, приводящий к уменьшению скорости ионного травления.

Кобурн и Винтерс [55] показали, что пучок электронов с энергией 1,5 кэВ, плотностью тока 50 mA/cm^2 при давлении ксенона и XeF_2 $6 \cdot 10^{-4}$ Торр вызывает удаление SiO_2 со скоростью $2,7 \text{ \AA/s}$. Тогда как по отдельности ни электронный пучок, ни XeF_2 не вызывают распыление окиси кремния.

Что касается воздействия распыления нейтронами совместно с ионами, то авторам доклада такие исследования не известны, как и многим участникам данной Конференции. Поэтому в решение 6-й Межгосударственной конференции "Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов" по предложению Н.В.Плешивцева записан п.5: "При исследовании кандидатных материалов для покрытий первой стенки и диверторных пластин Международного термоядерного экспериментального реактора необходимо провести изучение эффектов одновременного воздействия нейтронов и ионов рабочих газов и различных примесей на процессы распыления, поглощения трития, перенапыления, радиационных повреждений, десорбции газов, а также на изменение их механических свойств". П.6: "Обратить внимание металлургов и машиностроителей на возможности имплантации потоками быстрых ионов и атомов газов и металлов для существенного (в 2-4 раза) повышения износостойкости, коррозионной стойкости и других свойств сталей, сплавов, металлов и твердых сплавов. Эта рекомендация связана с большими успехами в экспериментальных и теоретических исследованиях по модификации свойств поверхностей всевозможных твердых веществ и достижениями в разработке источников ионов и инжекторов пучков быстрых ионов и атомов газов и металлов [56-68]." Достаточно сказать, что в конце 80-х годов в области ионной имплантационной технологии во всем мире затраты на выпуск и обслуживание ускорителей и имплантеров достигли нескольких миллиардов долларов в год.

Данная работа частично выполнена за счет гранта № JE 3100 Международного научного фонда и Правительства России, а также фонда фундаментальных исследований РНЦ "Курчатовский институт", грант № 102.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тамм И.Е. Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. I и III // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Т. 1. - М: Изд-во АН СССР, 1958. - С.3-19, 31-41.
2. Сахаров А.Д. Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. II. - Там же. - С.20-30.
3. Кадомцев Б.Б. Опытный термоядерный реактор // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. - 1984. - Вып. 1. - С. 78-79.
4. Орлов В.В. Разработка опытного термоядерного реактора. - Там же. - 1986. - Вып.1. - С. 3-5.
5. International Tokamak Reactor. Phase One/ International Atomic Energy Agency. Vienna, 1982, pp. 860.
6. ITER Plasma Facing Components. ITER Documentation Series, No30. T.Kuroda, G.Viender, M.Akiba et al. IAEA, Vienna, 1991. pp. 148.
7. Behrisch R. First wall erosion in fusion reactors. Nucl. Fusion, 1972, Vol.12, p. 691-701.
8. Гусев В.М., Гусева М.И., Гервидс В.И. и др. Вакуумно-физические условия выбора материала первой стенки и диафрагмы демонстрационного термоядерного реактора-токамака (Т-20), Препринт ИАЭ-2545.- М.: Институт атомной энергии им. А.В. Курчатова, 1975. - С. 16.
9. Гервидс В.И., Коган В.И. Зависимость радиационных потерь термоядерной плазмы от атомного номера примеси и температуры. Письма в ЖЭТФ, 1975,- Т.21. - №6. - С. 329-332.
10. Плешивцев Н.В. Физические проблемы катодного распыления. Обзор. Изд-во ИАЭ им. И.В.Курчатова. - М.,1979. - С. 87.
11. Гусева М.И., Ионова Е.С., Мартыненко Ю.В. К вопросу об эрозии первой стенки установки токамак // Атомная энергия. - 1980. - Т. 48. Вып. 3. - С. 162-166.
12. Альтовский И.В., Бурцев В.А., Глухих В.А. и др. Исходные принципы и основные направления программы работ по созданию и исследованию материалов термоядерных реакторов. Препринт НИИ ЭФА П-А-0434, 1979, - С. 26.
13. Исследование и разработка материалов для реакторов термоядерного синтеза. - М.: Наука, 1981.
14. Калинин Б.А., Скоров Д.М. Якушин В.Л. Проблемы выбора материалов для термоядерных реакторов. Радиационная эрозия. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - С. 183.
15. Гуляев Б.Б., Камышанченко Н.В., Неклюдов М.И., Паршин А.М., Пряхин Е.И. Структура и свойства сплавов /Под ред. А.М.Паршина и И.М.Неклюдова. - М.: Металлургия, 1993. - 317 с.
16. Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г., Об эрозии стенок токамака при срывах плазмы // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. - 1991. - Вып. 4. - С. 17-21.

17. Действие облучения на графит ядерных реакторов. - М: Атомиздат, 1978, - 272 с./ Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С., Карпухин В.И., Платонов П.А.

18. Виргильев Ю.С., Куроленин Е.И. Углеродные конструкционные материалы для термоядерных реакторов и их радиационная стойкость, ВАНТ. Серия ТС. - 1992. - Вып. 2. - С. 42-52.

19. Плешивцев Н.В., Мирнов С.В., Гусев В.М. и др. Материал первой стенки термоядерных установок и реакторов. Авт. свидет. СССР, №1131364, приоритет изобретения 15.02.1977.

20. Плешивцев Н.В., Ананьев С.П., Баратов Д.Г. Первая стенка термоядерного реактора. Авт. свидет. СССР №1135355, приоритет 15.03.1979.

21. Волков Г.М., Плешивцев Н.В. Способ получения композиционного материала. Патент Российской Федерации №2036977, приоритет 30.12.1992.

22. Волков Г.М., Плешивцев Н.В. Применение углеродных материалов. - М.: Знание, 1990. - С. 53.

23. Плешивцев Н.В., Виргильев Ю.С., Волков Г.М. и др. Физико-химические, механические и вакуумные свойства углеситалла и эрозия его поверхности при бомбардировке ионами водорода и гелия // Физика и химия обработки материалов. - 1981. - №6. - С. 30-38.

24. Плешивцев Н.В., Гусева М. И., Углов В.С., и др. Исследование термоциклической стойкости углеситалла // ВАНТ. Серия ТС. - 1981. Вып.2(8). - С. 50-55.

25. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В., Плешивцев Н.В. Проблемы первой стенки термоядерных реакторов. В Сб. Исследование и разработка материалов для реакторов термоядерного синтеза. - М.: Наука, 1981. - С. 106-115.

26. Жукова Л.М., Релина Н.В., Плешивцев Н.В. Изменение морфологии поверхности углеситалла под воздействием мощных импульсных пучков электронов (0,66-2,5 кВт/см²) // ВАНТ. Серия ТС. - 1984. - Вып.4(7). - С. 67-73.

27. Иванов Д.П., Плешивцев Н.В., Гарнов В.Н. и др. Воздействие плазмы на диафрагму из углеситалла и гранита в Токамаке-7 // ВАНТ. Серия ТС. - 1986. Вып. 4. - С. 36-42.

28. Беграмбеков Л.Б., Герчиков М.Ю., Гусева М.И. и др. Исследование взаимодействия ионов термоядерных энергий с поверхностью углеродсодержащих конструкционных материалов для термоядерных реакторов. Препринт ИАЭ - 4026/8. - М.: ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1984. - С. 40.

29. Мошкин С.А., Плешивцев Н.В. Расчет изменения поверхностной плотности потоков энергии на охлаждаемую стенку реактора-токамака при использовании одного или двух экранов из графита или углеситалла // ВАНТ, Серия ТС. - 1983. - Вып. I(II). - С. 50-53.

30. Виноградова Н.К., Беляков М.И., Плешивцев Н.В., Александров В.В. Исследование растворимости изотопов водорода в углеситалле.- Там же, 1983. - Вып. 3(13). - С. 54-55.

31. Герчиков М.Ю., Лозовский А.Д., Кощев А.П. и др. Изменение состава поверхности углеситалла при нагреве и ионной бомбардировке. Поверхность //Физика, химия, механика. - 1983. - №11. - С. 84-88.

32. Блинов П.И., Бакшаев Ю.Л., Басманов А.Б., Плешивцев Н.В. Стойкость гранита и углеситалла к воздействию микросекундного РЭП // ВАНТ. Серия ТС. - 1989. Вып. 2. - С. 41-43.

33. Волков Г.М., Захарова Е.Н., Калугин В.И. и др. Углеродсодержащий материал для изготовления эндопротезов. Авт. свидетельство СССР №1102184, приоритет 6.12.1977.

34. Garcia-Rosales C. and Roth J. Chemical sputtering of pyrolytic graphite and boron doped graphite USB-15 at energies between 10 and 10 1000 eV. Journal nuclear materials. 1992. Vol. 196-198, p. 573-576.

35. Brooks J.N. Erosion/redeposition analysis of the international thermonuclear experimental reactor divertor. Fusion technology, 1990, Vol.18, p. 239-250.

36. Гарбер Р.И., Доля Г.Л., Коляда В.М. и др. Радиационное распыление монокристалла золота быстрыми нейтронами. Письма в ЖТЭФ. - Том 7. Вып. 10. - С. 375.

37. Baer T.S., and Anno J.N. Sputtering of Iron by Fast Neutrons. J. Appl. Phys. 1972, Vol. 43, No5, p. 2453-2454.

38. Kaminsky M., Peavey J.H., Das S.K. Particle Release from Niobium Irradiated with 14-MeV Neutrons. Phys, Rev, Lett., 1974, Vol. 32, No 11, p. 599-602.

39. Kaminsky M. and Das S.K. Particle emission from solids under 14 MeV neutron impact. J. Nucl. Mater. 1974, Vol. 53, p. 162-170.

40. Kirk M.A., Blewitt T.H., Klank A.C. and Scott T.L. Neutron sputtering of Gold. Ibid. p. 179-182.

41. Behrisch R., Gahler R. and Kalus J. Sputtering yields of by 14 MeV neutrons and emission of recoils from (n, 2n) reactions in Au and Nb. Ibid., p. 183-188.

42. Robinson M.T. Remarks on the theory of fast neutrons sputter rings Ibid., p. 201-206.

43. Harling O.K., Thomas M.T., Brodzinski R.L., Rancitelli L.A. Sputtering of Nb and Au by (d, t) neutrons Phys. Rev. Lett., 1975, Vol. 34, No 21, p. 1340-1343.

44. Kaminsky M. and Das S.K. 14,1 MeV neutron sputtering of polycrystalline niobium with different surface microstructures. J. Nucl. Materials. 1976, Vol. 60, p. 111-116.

45. Behrisch R. Neutron sputtering. Nucl. Instrum. and Methods, 1976, Vol. 132, p. 293-300.

46. Behrisch R. Sputtering with neutrons. Ibid., 1982. Vol. 108/109, p.72-82.

47. Thomas M.T., Harling O.K., Brodzinsky R.L., Rancitelli L.A. Abstract: Neutron sputtering from metal foils. *J. Vac. Sci. Technol.* 1976, Vol. 13, No 1, p. 429.
48. – " – Abstract: (D, T) neutron radioactive sputtering yields. *Ibid.* p. 447-448.
49. Плешивцев Н.В. Катодное распыление. - М.: Атомиздат, 1968.- 343 с.
50. Проблемы прикладной физики. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел /Под редакцией Р.Бериша. Перевод с англ. под редакцией Б.А.Колчанова. - М.: Мир, 1984. - 336 с.
51. Там же. Выпуск II. Распыление сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности. - М.: Мир, 1986. - 484 с.
52. Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 249 с.
53. Ladgley A., Mados D. and Roth J. Synergistic Effects in Fusion Machines. - Session Summary. In Proceedings of workshop on Synergistic Effects in Surface Phenomena Related to Plasma-Wall Interactions. Edited by N.Itoh, K.Kamada and H.Tawara. Institute of Plasma Physics Nagoya University. IPPJ-AM-35, Nagoya, Japan, October 1984. - 265 pp.
54. Bohdansky J. and Roth J. Synergisms in Surface Erosion - Seccion Summary, *ibid.* p.74-95.
55. Auciello O., Haasz A.A. and Stangeby P.C. Synergism in Materials Erosion Due to Multispecies Impact. *Ibid.* p. 96-175.
56. Roberto J.B. Ion implantation technology in the national laboratories: four decades of technology transfer. In Application of Accelerators in Research and Industry'88. Proc. of the Tenth Internat. Conf. Denton, Texas, USA, Nov. 7-9, 1988. *Nucl. Instr. and Meth, in Phys. Res. Sec. B*, 1989, B40/41, p. 510-514.
57. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел: Сб. статей 1986-1987 гг.: Пер. с англ. /Составитель Е.С.Машкова.- М.: Мир, 1989. -349 с.
58. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Кукарин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 184 с.
59. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. - М.: Металлургия, 1990. - 216 с.
60. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 240 с.
61. Велихов Е.П., Елисеев Г.А., Рютов В.Д., Чевереv Н.С. Основные результаты исследований по УТС и физике плазмы в СССР за период с

июля 1990 по июль 1991 //ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. - 1992.- Вып. 1. - С. 3-20.

62. Плешивцев Н.В. Имплантация металлических материалов высокоинтенсивными пучками ионов азота //Известия РАН. Серия: Металлы. -1994. - №6. - С. 53-63.

63. Плешивцев Н.В., Красиков Е.А. Защита от коррозии металлов, сплавов и сталей ионной бомбардировкой. Обзор. - Там же. - 1995. - №4.- С. 98-126.

64. Ионная имплантация / Под ред. Дж. К. Хирвонена. Перевод с англ. под ред. О.П. Елютина. - М.: Металлургия, 1985. - 391 с.

65. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. - М.: Радио и связь, 1986. - С 231.

66. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками /Под ред. Дж.М.Поута, Г.Фоти, Д.К.Джекобсона: Перевод с англ. под ред. А.А.Углова - М.: Машиностроение, 1987. - 424с.

67. Валиев К.А., Раков А.В. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. - М.: Радио и связь, 1984. - 350 с.

68. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 327 с.

69. Лаврентьев О.А., Петренко В.И., Карпухин В.И. Интенсивные нейтронные источники для радиационных испытаний конструкционных материалов ТЯР // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез, 1980. - Вып. 2.- С. 10-19.

О ДИСКРЕТНОМ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ХАРАКТЕРЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В СТАЛЯХ ПЕРЛИТНОГО КЛАССА

Г. Н. Теплухин
СПбГТУ

Приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о дискретном пульсирующем характере образования продуктов превращения аустенита в сталях перлитного класса. Наиболее четко дискретный характер образования продуктов превращения аустенита проявляется в изотермических условиях, когда базовый переход прерывается из-за повышения температуры вследствие теплового эффекта образования карбидных частиц. При непрерывном охлаждении основная причина дискретности структурообразования состоит в изменении температурно-концентрационных условий базового перехода.

Дискретный пульсирующий характер базовых превращений впервые заметил профессор А.С.Завьялов [1]. Последующие исследования [2,3 и др.] не только подтвердили справедливость основных положений,