

Физико-математические науки

УДК 621.039, 539..142

Жижко Владимир Абрамович

независимый эксперт

Жижко Володимир Абрамович

незалежний експерт

Zhyzhko Vladimir

Independent Expert

**О ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ
ПРО ЯДЕРНУ ЕНЕРГЕТИКУ
ABOUT THE NUCLEAR ENERGETICS**

Аннотация. *Кратко изложены состояние традиционной ядерной энергетики, исследований возможности термоядерного синтеза, обозначены новые перспективные конструкции реакторов средней и малой мощности. Также предложена модель формы ядра урана-238.*

Ключевые слова: *реакторы деления, ядерный синтез, уран-238.*

Анотація. *Коротко викладені стан традиційної ядерної енергетики, досліджень можливості термоядерного синтезу, позначені нові перспективні конструкції реакторів середньої та малої потужності. Також запропонована модель форми ядра урану-238.*

Ключові слова: *реактори ділення, ядерний синтез, уран-238.*

Summary. *The state of traditional nuclear energy, studies of the possibility of thermonuclear fusion are briefly outlined, new promising structures of medium and low power reactors are identified. A model of the uranium-238 nucleus shape is also proposed.*

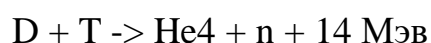
Key words: *fission reactors, nuclear fusion, uranium-238.*

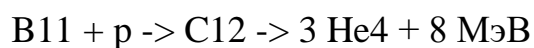
Современное состояние ядерной энергетики

Основу современной ядерной энергетики составляют АЭС с мощностью блока порядка 1000 мегаватт, обычно с несколькими блоками на одной АЭС. Сжигание топлива происходит в реакции деления урана-235 тепловыми нейтронами. Доля атомной энергии в энергетическом балансе составляет, к примеру, в США – 20%, Франции – 76 %, Украине – 55%. В Индии, имеющей значительные залежи тория, разрабатываются и эксплуатируются блоки на основе ториевого топливного цикла. Другие страны не развивают это направление из-за сильной токсичности продуктов трансмутации тория (период полураспада урана-232, одного из отходов ториевого цикла, равен 69 лет) и интенсивного гамма-излучения, вредного для работы электронного оборудования и персонала. Реакторы на быстрых нейтронах (РБН) используют нейтроны с энергией, получаемой нейтронами в процессе деления ядер (без замедления нейтронов). Поскольку сечения захвата нейтрона ядром U-235 на высоких энергиях мало (2 барн), этот тип реакторов требует экстремальных условий эксплуатации: мощные нейтронные потоки, высокая плотность ядерного топлива, теплоноситель – расплав вещества из средних или тяжёлых ядер (натрий, свинец), поскольку лёгкие ядра замедляют нейтроны. Как следствие – высокие требования к радиационной стойкости конструкции реактора. Одним из преимуществ РБН является возможность вовлечения U-238 и Th-232 в цикл размножения ядерного топлива (бридер). Сейчас РБН действуют только в России, блок БН-800 на Белоярской АЭС.

Проблемы термоядерного реактора

Сейчас в экспериментальной разработке находятся 4 типа реакторов: токамак, стелларатор, линейный с магнитными пробками, лазерный инерционный. В качестве основных рассматриваются три реакции синтеза





Первая реакция зажигается при температуре дейтериево-тритиевой плазмы порядка нескольких десятков миллионов градусов, что является наименьшей величиной для реакций синтеза. Недостаток этой реакции состоит в том, что основным носителем извлекаемой энергии являются нейтроны. Предполагается, что для утилизации этой энергии вокруг основного блока реактора нужно установить водную подушку - вода эффективно тормозит нейтроны и послужит теплоносителем. Проблема заключается во вредном воздействии нейтронов на основную конструкцию реактора из-за высокой наведенной активности, что повлечёт быстрый выход системы из строя. По оценкам, активность в 1000 рентген на основном оборудовании реактора будет достигнута за месяц его работы. Так что говорить о термоядерной энергетике как экологичной вряд ли стоит. Реакции 2 и 3 безнейтронные.

Реакция с бором требует температур поджига реакции на порядок выше (заряд иона бора в полностью ионизованной плазме в 5 раз больше заряда изотопов водорода). Технологией утилизации кинетической энергии протонов и ионов гелия может быть прямая МГД-генерация электричества. Поток альфа-частиц по сравнению с нейтронами можно считать нетоксичным.

О холодном ядерном синтезе. Идея трансмутации ядер под действием неядерных сил в самой своей постановке выглядит не очень логичной, особенно для целей добычи энергии в промышленных количествах (хотя и деление ядер тепловыми нейтронами тоже можно воспринимать как подарок природы). Некоторые макетные образцы установок холодного синтеза даже продуцируют небольшое количество нейтронов, но мощность производимой энергии в несколько киловатт остаётся сложной задачей, как и накопление энергии в несколько ампер-

часов. Вопрос - какой из видов внутренней энергии высвобождается, пока не имеет убедительного ответа.

Перспективные реакторы

Отношение к ядерной энергетике в мире различное. Некоторые страны планируют закрывать АЭС, некоторые строят или планируют строить новые блоки. Перспективными источниками энергии на ближайшие десятилетия представляются АЭС с малыми модульными реакторами (SMR) на основе реакций деления ядер и брідерного цикла. Такие АЭС имеют ряд преимуществ перед крупными АЭС, а именно:

- вдвое меньшие сроки строительства;
- большой срок эксплуатации (80 лет);
- полное выгорание топлива (на больших блоках – около 3%);
- топливо загружается один раз на весь срок эксплуатации модуля;
- высокая маневренность, возможность изменить мощность на 20% за час, что сравнимо по этому показателю с тепловыми станциями;
- высокая ремонтпригодность;
- возможность строительства на площадках отслуживших атомных или тепловых станций;
- гораздо менее вредные отходы;
- гораздо меньшие затраты на закрытие станции по сравнению с традиционными блоками.

Наиболее проработанным проектом сейчас является SMR-160 фирмы Holtec мощностью 160 мегаватт. Работы по малым модульным станциям ведутся в десяти странах.

Матричный бустерный реактор

Среди многочисленных вариантов конструкции реакторов деления можно выделить также нейтронный бустер – это реактор импульсного действия, в котором запуск реакции деления происходит от внешнего источника нейтронов, а цепная реакция происходит вдали от критического

режима. Избежать критичности позволяют два фактора – прерываемое внешнее возбуждение реакции (частота импульсов – несколько герц) и геометрия топливных элементов (тонкие пластины). Матричный реактор – это совокупность одинаковых маломощных модулей, каждый из которых снабжён контроллером и набором датчиков, что позволяет в случае нештатного поведения отключить модуль без остановки системы целиком.

Отключая ряд модулей, можно маневрировать мощностью. Примерные параметры такого реактора – мощность модуля 100 киловатт, размеры матрицы модулей 10 * 10. Для получения внешних нейтронов используется ускоритель протонов, пучок из которого поочерёдно направляется на каждый топливный элемент («строчная развёртка» пучка). Перед каждым топливным элементом располагается литиевая мишень, из которой протоны выбивают нейтроны. (Протоны высокой энергии способны выбивать нейтроны непосредственно из урана). В качестве теплоносителя в модуле бустера используется вода.

О форме ядра U238

Уран-238 составляет более 99% изотопного содержания в руде, на долю урана-235 приходится около 0.7%. Последний ценен из-за возможности деления тепловыми нейтронами. Уран-238 используется для получения плутония -239, а также благодаря его высокой твёрдости – в обычных бомбах и снарядах. Всякое новое знание свойств и особенностей урана-238 может оказаться полезным для более широкого использования урана-238 в энергетике. Ниже рассматривается модель форма ядра урана-238. .

Заключение о форме ядра U238 можно сделать исходя из предположения о максимальной симметрии. Учёт симметрии важен по ряду причин [1]:

- с элементами симметрии связаны законы сохранения, наличие среди элементов симметрии осей вращения прямо указывает на орбитальные степени свободы;
- в уравнениях, описывающих поведение симметричных объектов, обычно удаётся уменьшить количество переменных (размерность), что упрощает поиск решения вплоть до нахождения аналитического решения;
- «мы говорим о геометрии, а думаем об энергии» (В.А.Франк-Каменецкий). Этому высказыванию есть простое объяснение – выражение для потенциальной энергии в уравнении Шредингера описывается как зависимость от координат, т.е. описывается геометрическая форма.

На основании тетраэдрической модели пространства ядра [2] можно определить конфигурацию ядра с максимальной симметрией. Для U238 такой конфигурацией является пространственный объект из 14 кластеров типа F в терминах, описанных в [2]. Кластер F состоит из 17 тетраэдров, образующих 4 грани (интерфейсы $b=$), так что к одному кластеру F можно присоединить до 4-х таких же кластеров. Форма кластера F показана на рис.1. Количество граней $b=$ кластера F равно количеству простых граней



Рис. 1. Кластер F и тетраэдр



**Рис. 2. Конфигурация из 7 кластеров.
Вид сверху и снизу**

тетраэдра. Элементы симметрии тетраэдра – 4 (по количеству вершин) оси вращения 3-го порядка и 6 (по количеству рёбер) плоскостей зеркального отражения [3]. Кластер F является фракталом тетраэдра (вторым координационным тетраэдром). Это позволяет заменить конфигурацию из кластеров F упрощённой конфигурацией из тетраэдров, приблизительно сохраняя наглядность конфигурации. Промежуточная конфигурация из семи “кластеров” показана на рис.2. Два объекта промежуточной конфигурации можно соединить в один, обладающий высокой степенью симметрии, двумя способами, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Две симметричные конфигурации из 14 кластеров

Конфигурацию 3а можно сопоставить короткоживущему изомеру формы [4] изотопа 238, а 3б – основному “стабильному” изотопу урана-238. Этот объект имеет ось вращения 3-го порядка и 3 зеркальные плоскости симметрии. Если для U235, исходя из его формы (линейная цепочка из пяти кластеров Y), можно было сразу определить состав продуктов деления (соотношение масс 2:3), то для U238 подобное заключение только на основании формы ядра сделать нельзя. Но из оболочечной модели следует, что масса и заряд тяжёлого осколка будут такими, чтобы количество нейтронов или протонов оказалось магическим числом или близким к нему. Для урана таким конечным осколком будет ксенон. Так что кривые распределения осколков для 235 и 238 могут отличаться слабо. Зато основываясь только на модели формы этих ядер,

можно сделать предположение о существенном различии двух их характеристик - кластерной радиоактивности [5] и внешнего квадрупольного момента. А именно, кластер F в ядре U238 имеет параметры $A=17$, $Z=7$. Из-за избытка нейтронов в таком кластере, после его бета-распада конечным продуктом кластерной активности будет ядро кислорода с $A=17$, $Z=8$. Ядро урана-235 состоит из кластеров с $A=47$, т.е. существенно более тяжёлых чем у ядра 238. (Хотя кластерная активность и спонтанное деление изотопов урана имеют сравнимые (около $10^{(20)}$ лет) периоды полураспада, это процессы с разными продуктами распада). Из сравнения форм ядер 235 и 238 в невозбуждённом состоянии можно заключить: ядро 235 имеет вытянутую форму и соответственно большой внешний квадрупольный момент (4 барн), ядро 238 гораздо более компактное и должно иметь квадрупольный момент, по меньшей мере, на порядок ниже. Обе характеристики (кластерная активность и внешний квадрупольный момент) доступны для измерения.

Литература

1. Вигнер Е. Этюды о симметрии, М., Мир, 1971. 320 с.
2. Жижко В А. Геометрическая модель ядер при минимальном количестве сильных связей // Журнал Интернаука. 2016. № 8. С. 69-79.
3. Зоркий П.Н. Симметрия молекул и кристаллических структур. М. Изд-во Моск. Ун-та. 1986. 232 с.
4. Электронный ресурс: Википедия. Изотопы урана.
5. Бекман И.Н. Ядерная физика, Курс лекций, М., МГУ, 2010 г., лекция 9. Экзотические типы распада, п.8. Кластерная радиоактивность.