УДК 621.039.6

ОСОБЕННОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ РЕАКЦИИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА, ИНЕРЦИОННОЕ УДЕРЖАНИЕ.

Игольников А.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Аннотация: полезное использование энергии, полученной при осуществлении реакции термоядерного синтеза, является одним из наиболее перспективных направлений на сегодняшний день. Данная работа содержит в себе информацию об особенностях осуществления термоядерного синтеза, а также методах и используемых установках. Однако наибольшее внимание уделяется технологии инерционного удержания, комплексам, которые реализуют данный процесс, а также достижениям ученых и дальнейшим перспективам в данной области работ.

Ключевые слова: термоядерный синтез, инерционное удержание, NIF, Shiva, Nova, Argus, Cyclops, Janus, УФЛ-2М.

FEATURES OF THE REALIZATION OF THE THERMONUCLEAR SYNTHESIS REACTION, INERTIAL HOLDING.

Igolnikov A.A.

Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Annotation: the useful use of energy obtained in the implementation of the reaction of thermonuclear fusion is one of the most promising directions for today. This work contains information about the features of the implementation of thermonuclear fusion, as well as methods and installations used. However, most attention is paid to inertial retention technology, to complexes that implement this process, as well as to the achievements of scientists and further perspectives in this field of work.

Key words: thermonuclear synthesis, inertial confinement, NIF, Shiva, Nova, Argus, Cyclops, Janus, UFL-2M.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из характеристик современного общества является потребление электроэнергии в огромных масштабах. Для того чтобы восполнить её недостаток, на сегодняшний день активно применяются знания в области атомной энергетики для постройки, эксплуатации и усовершенствования атомных электростанций. Однако и этого, в скором времени, может оказаться недостаточно. Кроме того, существует ряд факторов, который приводит к усиленному внедрению новых технологий в область получения электроэнергии с помощью использования и преобразования энергии, выделившейся в результате какого-либо физического процесса. Это связано с тем, что ресурсы нашей планеты ограничены, и корреляция полезных ископаемых по отношению к различным территориям нашей планеты довольно высока, следовательно, одни страны обладают большим количеством урановых руд, а другие – испытывают её недостаток. Данный факт в некоторой степени осложняет использование энергии деления тяжелых ядер в промышленности. Также необходимо учитывать опасения людей, связанные с использованием атомной энергии, поскольку это сказывается на распространении технологий между странами, что влечет за собой устаревание и неэффективность существующих установок. К тому же, до сих пор не решена проблема, связанная с радиоактивными отходами, которые накапливаются в хранилищах[6].

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На сегодняшний день, наиболее перспективным направлением в области поисков новых и безопасных источников энергии является использование реакции термоядерного синтеза. Реакция термоядерного синтеза представляет собой слияние двух легких атомных ядер ($A<56$ согласно рисунку 1), в результате чего образуются ядра других элементов, и выделяется энергия.

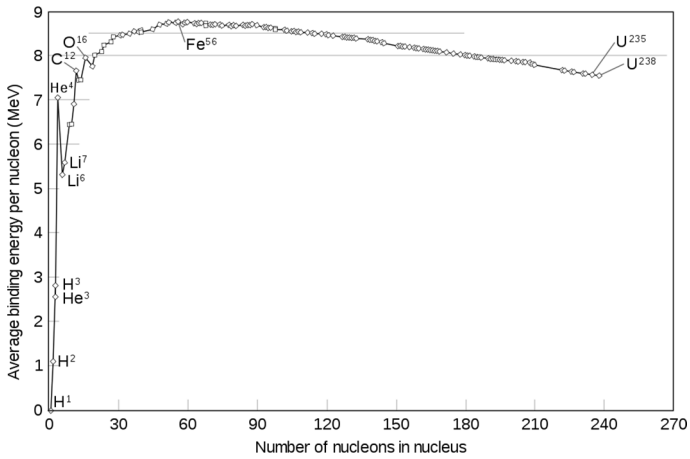

Рисунок 1. Зависимость энергии связи от числа нуклонов в ядре[5]

Причина слияния ядер заключается в том, что частицы движутся с очень большой кинетической энергией, настолько большой, что при столкновении сближаются на расстояния, при которых сильное взаимодействие начинает преобладать над кулоновским отталкиванием, следовательно, образуется новое атомное ядро.

Рассмотрим несколько наиболее интересных, с практической точки зрения, видов термоядерных реакций[4]:

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + 3{,}25\ \text{МэВ} \quad (1) $$

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} + 4\ \text{МэВ} \quad (2) $$

$$ {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + 17{,}6\ \text{МэВ} \quad (3) $$

$$ {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} + 18{,}3\ \text{МэВ} \quad (4) $$

Реакции (1) и (2) происходят примерно с одинаковой вероятностью, однако они идут труднее, чем реакции (3) и (4). Реакции (3) и (4) интересны благодаря большему энергетическому выходу, а также потому, что они происходят на продуктах реакций (1) и (2) [3]. Необходимо отметить, что, как видно из рисунка 2, наибольшее сечение реакции имеет реакция (3), она осуществима при наиболее низкой температуре, однако обладает рядом недостатков: высокая цена трития и нейтронное излучение[5].

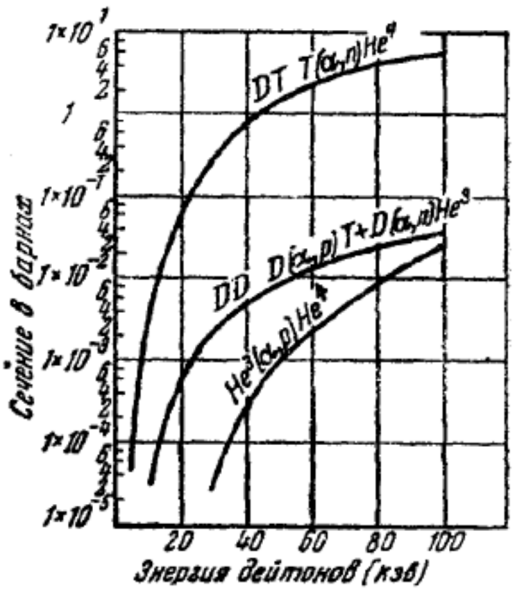

Рисунок 2. Зависимость сечений для реакций слияния от относительной энергии частиц[4].

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕАКЦИИ ТЕРОМЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Для осуществления реакции термоядерного синтеза, имеющей положительный эффект (выделяемая энергия больше поглощаемой), необходимо, чтобы топливо было нагрето до высоких температур, при которых кинетическая энергия позволяет частицам сливаться, преодолевая кулоновские силы отталкивания. Кроме того, важно поддерживать данную температуру в течение некоторого времени, т.е. топливо должно быть теплоизолировано.

Существует критерий Лоусона, который связывает время удержания высокотемпературной плазмы в системе и плотность ее частиц: $\tau \cdot n \geq 10^{14}\ {}^{c}\!/_{см^3}$. При выполнении этого критерия энергия, выделяющаяся при управляемом термоядерном синтезе, превышает энергию, вводимую в систему[1]. Из этого следует, что возможно два подхода к осуществлению термоядерной реакции: длительное удержание плазмы, имеющей низкую плотность или осуществление “быстрой” реакции, создав плазму высокой плотности. Для реализации первого подхода был применен способ магнитного удержания плазмы, т.е. плазму контролируют с помощью магнитного поля, второй подход был осуществлен с помощью инерционного удержания под воздействием мощных лазеров. Соответственно можно выделить 2 ветви развития по реализации реакции термоядерного синтеза, рассмотрим одну из них более подробно.

ИНЕРЦИОННОЕ УДЕРЖАНИЕ

Суть данного подхода состоит в воздействии лазерного излучения на шарик, содержащий дейтерид лития (данное вещество активно используется при создании водородных бомб). Лазерная вспышка мгновенно разогревает поверхность шарика, вызывая испарение верхнего слоя вещества и резкое сжатие шарика. Он «схлопывается», и возникающая при этом ударная волна доходит до самого его центра, заставляя температуру внутри шарика подскочить до миллионов градусов — уровня, необходимого для слияния ядер водорода с образованием ядер гелия[7].

Первопроходцем в области осуществления реакции термоядерного синтеза посредством воздействия лазерного излучения является Ливерморская национальная лаборатория им. Э. Лоуренса. В ней в 1974 году был создан двулучевой инфракрасный лазер Janus, который имел неодимовое стекло, легированное кварцем. Энергия излучения данной установки составляла всего 10 Дж. С этого момента началось бурное развитие лазерной техники, предназначенной для осуществления реакции термоядерного синтеза. В течение следующих двух лет были созданы лазерные установки Argus и Cyclops. Необходимость их создания заключалась в изучении возникновения нелинейных оптических эффектов, а также проблем фокусировки лазерного луча при излучении высокой интенсивности. Проведенные исследования привели к созданию новых по структуре и составу стекол, применяемых в конструкции лазерных установок, а также был разработан метод линейной фильтрации, который в совокупности с группами усилителей, позволял добиваться большей стабильности лазерного пучка, следовательно, большей энергии излучения. Например, лазер Argus позволял производить пучки мощностью 4 ТВт при коротких импульсах (до 100 пикосекунд) или 2 ТВт при длинных импульсах (более 1 наносекунды). Однако применение данного метода привело к существенному увеличению размеров лазерной установки, что повлекло за собой создание таких лазеров как Shiva (1977) и Nova (1984), но, ни один из них не смог обеспечить водородному шарику должное зажигание[7]. Только в 2013 году научным комплексом National Ignition Facility была реализована термоядерная реакция, в результате которой впервые в мире энергия, выделенная в ходе реакции, превысила энергию, поглощенную мишенью[9]. Сам комплекс представляет собой 192 лазера, при одновременном использовании которых общая энергия пучков достигает 1,8 МДж, воздействующих на крохотную мишень миллиардные доли секунды.

Рисунок 3. Один из лазерных ангаров комплекса NIF[10].

Сама мишень содержит в себе маленькую сферу из замороженных дейтерия и трития (18 К), которые находятся внутри пластикового аблятора (оболочки, испаряющейся после обстрела мишени)[8]. Лазеры не воздействуют напрямую на мишень, поскольку в данном случае происходит неравномерное сжатие сферы, поэтому применяется метод непрямого сжатия: излучение попадает на стенки полости (хольраум), в которой находится сфера; под действием лазерного излучения стенки испаряются, превращаясь в плазму; плазма, в свою очередь, начинает излучать в рентгеновском диапазоне, что приводит к равномерному обжатию мишени.

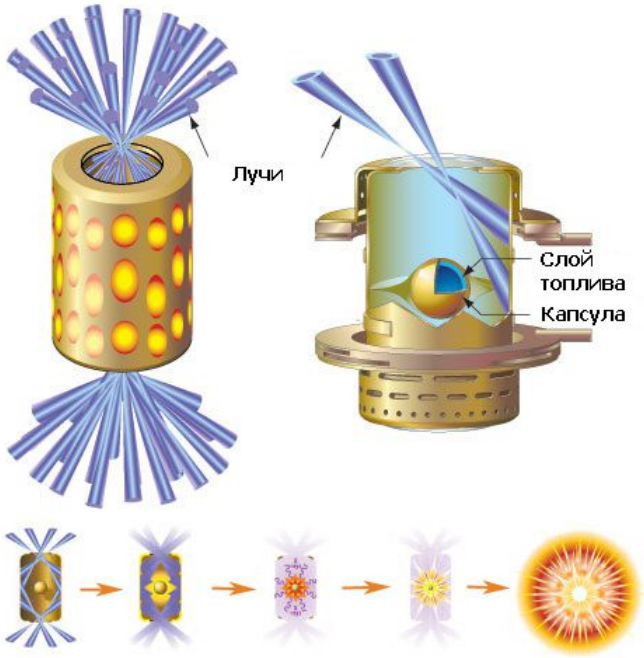

Рисунок 4. Иллюстрация нагрева полости (хольраума), в которую помещена мишень[2].

Необходимо упомянуть, что на сегодняшний день в городе Сарове осуществляется постройка лазерной установки УФЛ-2М, которая по некоторым данным будет самой мощной лазерной установкой по реализации реакции термоядерного синтеза. Она представляет собой 192-канальный твердотельный лазер на неодимовом стекле с размером пучка 400×400 мм^2. Планируемая энергия на мишени составляет 2,8 МДж, что значительно превышает энергию излучения комплекса NIF (1,8 МДж)[3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на развитие лазерных установок по осуществлению реакции термоядерного синтеза, проведенные эксперименты и полученные данные, на сегодняшний день существует множество проблем, которые делают более перспективным метод магнитного удержания. Проблемы эти связаны, прежде всего, с передачей энергии от лазеров сфере, содержащей термоядерное топливо, поскольку только доли процента от энергии излучения идут на осуществление реакции, что приводит к недостаточному сильному сжатию.

Кроме того, “глубина” реакции существенно зависит от первоначальной температуры мишени, толщины её пластиковой оболочки, а также от амплитуды и длительности лазерного излучения. Необходимо найти баланс и подходящий режим работы, проводя дополнительные исследования и варьируя указанные параметры, чтобы прийти не только к получению полезной энергии, но и осуществить самоподдерживающуюся реакцию, т.е. довести мишень до “зажигания”.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бекман И.Н. Ядерная физика // М.: Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Химический факультет, Кафедра радиохимии, 2010. — 511 с.

2. Крупнейший лазер направил тераватты на кончик ядерной иглы [Электронный ресурс], - http://www.membrana.ru/particle/3317

3. Лазерная установка УФЛ-2М [Электронный ресурс], - http://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:РФЯЦ-ВНИИЭФ:_Лазерная_установка_УФЛ-2М

4. Пост Р. Применение физики высокотемпературной плазмы к осуществлению управляемых реакций слияния атомных ядер // УФН 61. 1957. С. 491–533.

5. Управляемый термоядерный синтез [Электронный ресурс], - http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D1%8F%D0%B5%D0%BC%D1%8B%D0%B9_%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%8F%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B7

6. Шавунова С. Б. Проблемы хранения, переработки и захоронения радиоактивных атомных отходов в России // Актуальные проблемы права: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2015 г.). — М.: Буки-Веди, 2015. — С. 181-184.

7. Kaku M. Physics of the Impossible: A Scientific Exploration Into the World of Phasers, Force Fields, Teleportation, and Time Travel. // Doubleday, New York, 2008, 329 pages

8. Laser fusion passes milestone [Электронный ресурс], - http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/feb/12/laser-fusion-passes-milestone

9. National_Ignition_Facility [Электронный ресурс], - http://ru.wikipedia.org/wiki/National_Ignition_Facility

10. Photo Gallery [Электронный ресурс], - http://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery