

УДК 621.039

**МИРНЫЙ АТОМ:  
ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПРОЕКТ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

Коротун И.С., курсант гр. 222, II курс

Научный руководитель: Жидкова Е.Ю., к.т.н., доцент

Черноморское высшее военно-морское орденов Нахимова и Красной Звезды  
училище имени П.С. Нахимова

г. Севастополь

В настоящее время большую часть энергии человечество получает от сжигания органических ископаемых – угля, нефти и газа, количество которых, безусловно, со временем уменьшается. По прогнозам Госкомиссии по запасам полезных ископаемых с учетом текущей добычи газа, к примеру, его хватит еще на 90 лет [1]. Возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая, геотермальная и др. энергия, не могут обеспечить достаточного выхода энергии, чтобы стать полноценной заменой ископаемого топлива. По данным российской ассоциации альтернативной энергетики на 2022 год доля возобновляемых источников энергии в общем объеме выработки электроэнергии составляет около 0,5 [2]. На сегодняшний день атомная энергетика становится перспективным направлением в сфере получения электроэнергии. Существует два направления в ядерной энергетике получения энергии: деление атомов тяжелых элементов и синтез легких ядер. В первом способе, используемом на существующих атомных электростанциях, энергию получают в большом количестве, но побочные продукты от деления очень радиоактивны и долговечны.

Одним из перспективных источников энергии будущего являются реакции термоядерного синтеза, в ходе которых происходит слияние ядер легких элементов. Наиболее практическими для подобных взаимодействий, а вместе с тем и активно применяемыми на практике, являются изотопы водорода – дейтерий и тритий. Их использование обусловлено достаточно большим сечением взаимодействия в реально достижимой области температуры разогрева плазмы в искусственных условиях, очень высоким уровнем энерговыделения, а также их распространённостью в природе.

При слиянии ядер дейтерия и трития образуется ядро гелия-4 и нейтрон, который несёт 80% энергии синтеза (1):



Ядра гелия-4 остаются в плазме и вносят свою энергию для поддержания термоядерной реакции. Нейтроны поглощаются первой стенкой в токамаке, нагревают её, а затем тепло отводится для дальнейшего превращения его в электроэнергию.

Однако в обычных условиях данная реакция не осуществима, так как для подобного взаимодействия атомам необходимо преодолеть кулоновский барьер, а значит им необходимо обладать высокой кинетической энергией. В рамках термоядерного синтеза данное состояние достигается за счёт сильного повышения температуры системы – приблизительно до  $10^9$  К [3]. При данной температуре вещество находится в состоянии полностью ионизированного газа – плазмы.

Кроме того, практика показала – для продолжительного выхода энергии, плазма в реакторе должна удовлетворять критерию Лоусона (2) [4]:

$$n \cdot \tau \cdot T > 3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ с} \times \text{кэВ} \quad (2)$$

где:

$\tau$  – время удержания энергии, в течении которого плазма сохраняет достаточную для прохождения реакции энергию;

$n$  – концентрация частиц плазмы;

$T$  – температура плазмы;

Именно поиск наиболее оптимальных методов достижения критерия Лоусона представляют собой в настоящее время главную цель в исследованиях управляемого термоядерного синтеза. Одним из факторов, влияющих на термоядерный синтез, является температура. В рамках данной статьи будет рассмотрена возможность его достижения путём увеличения температуры, а именно – современные и актуальные методы нагрева плазмы, позволяющие получить необходимую температуру с наибольшим КПД. К рассматриваемым методам относятся: омический нагрев, инжекция пучков нейтральных частиц, высокочастотный метод.

Омический нагрев плазмы осуществляется за счет выделения джоулева тепла при протекании по плазменному шнуру тока, создаваемого вихревым электрическим полем [5]. Кроме нагрева, данный ток выполняет и другие ключевые функции, как например контроль плазмы, недопущения неустойчивостей и так далее. Важным моментом является то, что увеличение электронной температуры при достижении определённых, недостаточно высоких значений, приводит к уменьшению сопротивления плазмы, и как следствие омический нагрев становится не эффективен. Необходимо использование других, дополнительных методов нагрева.

Инжекция пучков нейтральных частиц – метод нагрева, основанный на инжекции сторонних, предварительно ускоренных нейтральных частиц [6]. Процесс происходит в 4 этапа (рисунок 1) [7].

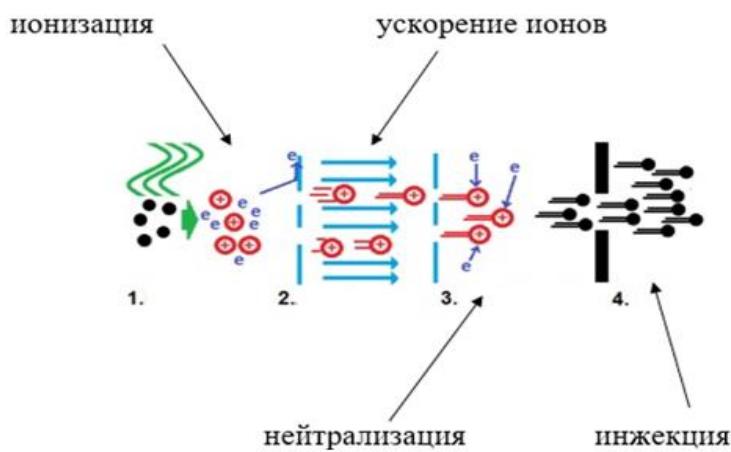


Рисунок 1

соединения электронов, вновь становятся нейтральными атомами)

4. Данные нейтральные атомы инжектируются в плазму, за счёт их столкновений с содержащимися в ней электронами и ионами происходит нагрев.

Такой метод позволяет производить дополнительный нагрев плазмы, относительно контролировать энергию, которую приобретает ускоряемая частица, а также направление её поступления в нагреваемую плазму.

Однако при попытке ускорения положительного иона выше определённого порога, значительно уменьшается вероятность его нейтрализации, что приводит к падению КПД данного метода.

Высокочастотный метод – нагрев плазмы вводимым в неё высокочастотным излучением, происходящий из-за резонансного взаимодействия возбуждаемых в плазме электромагнитных волн с её электронами или ионами (рисунок 2) [6].

Поток электронов из электронной пушки попадает в резонатор, находящийся в магнитном поле, и возбуждает в нём электромагнитные колебания. Из полного спектра колебаний при помощи антennы и квазиоптических отражателей выделяют колебания с нужной частотой, которые через вакуумные окна вводятся в плазму. Коллектор поглощает электроны, вылетевшие из резонатора.

Данный метод характеризуется простотой управления внутренней структурой разряда путем изменения электродинамических



Рисунок 2

характеристик устройства ввода энергии в плазму, а также относительно низкими энергозатратами. Наибольший нагрев достигается при получении колебаний на резонансной частоте, соответствующей частицам, на которые планируется воздействие. На этом принципе работает гиротрон. Однако выделяемой при этом энергии недостаточно для самостоятельного применения данного метода.

Основным недостатком вышеперечисленных методов, который не позволяет уже сейчас получать необходимое количество энергии, является недостаточно высокое КПД каждого способа по отдельности, а следовательно, и всего процесса термоядерного синтеза в целом.

В настоящее время для решения этой проблемы реализуется многомиллиардный проект ИТЕР (Интернациональный термоядерный экспериментальный реактор), над которым работают специалисты из России, Швейцарии, США, Индии, Китая, Южной Кореи и Японии [8]. Завершение создания установки намечено на 2025 год. В ней используется комбинация ранее рассмотренных методов, которые претерпели ряд ранее никогда не используемых преобразований, значительно увеличивающих их КПД. Данные модернизации должны в значительной мере способствовать увеличению температуры в реакторе, которая по мнению конструкторов должна примерно в десять раз превысить температуру в ядре Солнца [9].

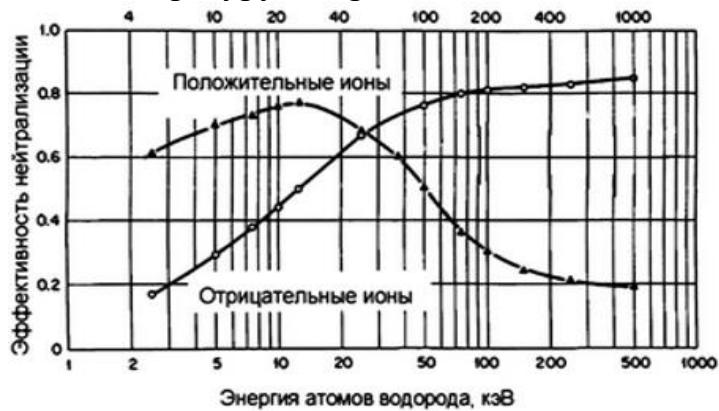


Рисунок 3

эффективность метода нагрева при помощи инжекции. Как было сказано ранее, проблема данного метода заключалась в сложности нейтрализации положительных ионов, обладающей высокой потенциальной энергией. Теперь подход поменялся: уже отрицательные ионы разгоняются высоким положительным потенциалом, а затем нейтрализуются.

Как видно на графике, представленном на рисунке 3, нейтрализация положительных ионов эффективна лишь при сравнительно небольших значениях энергии (пик эффективности приходится на энергию около 14 кэВ и составляет около 75% нейтрализации). В свою очередь пик эффективности нейтрализации отрицательных ионов соответствует энергии в 1000 кэВ и равен приблизительно 85%, что говорит о безусловном превосходстве данного подхода.

Так, впервые была применена система инжекции пучков нейтральных частиц с использованием отрицательных ионов [10]. Опытным путём выявлено, что вероятность оторвать электрон у отрицательно заряженного иона выше, чем добавить электрон к положительно заряженному иону, а именно так поступали прежде. Это наблюдение позволило увеличить эф-

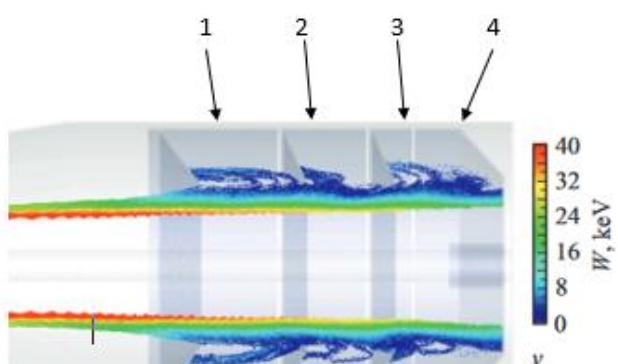


Рисунок 4

Высокочастотный метод также подвергся определённым изменениям. В частности, начала применяется рекуперация остаточной энергии электронного потока (рисунок 4) [11]. После вылета электронов из источника, часть из них отклоняется от заданного направления (в результате соударений), в следствии чего не попадает в отражатели. Электроны с большей энергией про-

должают дальнейшее движения, попадая в коллектор, а с меньшей энергией подвергаются рекуперации, то есть за счёт магнитных полей смещаются в соответствующие их энергии отделения (в гиротроне ИТЭР таких отделений четыре), в которых их энергия поглощается и направляется на дальнейшую работу системы, что и обеспечивает повышение КПД (КПД гиротрона без рекуперации 30-35%, с рекуперацией около 50%)

Другой значимый вопрос, который встал на пути реализации данного проекта – материал, из которого должен быть сделан диск выходного окна гиротрона подобной мощности. До начала работ над ИТЭР такой материал не был известен. Однако после их старта, и, как следствие, возникновения данной проблемы, он был обнаружен. Это искусственный поликристаллический алмаз [12]. Данный материал обладает уникальными свойствами. Он имеет высокую теплопроводность, позволяющую охлаждая диск по краю, делать его холодным полностью несмотря на то, что он нагревается в центре. Также у алмазного диска маленькие потери на необходимых для реализации данного метода частотах, а вместе с тем достаточная прочность.

В рамках международного сотрудничества наметился «прорыв» в области ядерной энергетики за счет модернизации существующих методов нагрева плазмы и их комбинированного использования, повышения КПД и создания искусственных материалов со специфическими свойствами для успешного осуществления управляемого термоядерного синтеза.

ИТЕР – крупнейший проект в данной отрасли, который до своего окончательного создания уже оказал серьёзное влияние как на управляемый термоядерный синтез, стимулировав решение давно сформировавшихся проблем в области нагрева плазмы, так и на другие сферы человеческой жизни. Так, например, после обнаружения эффективности использования отрицательных ионов для повышения КПД инъекции, обнаружилась возможность использовать их для предотвращения образования раковых опухолей.

За счёт возможности создания и поддержания необходимой для термоядерного синтеза температуры, ИТЕР должен показать перспективы этого направления в области энергетики, продемонстрировать возможность управляемого термоядерного синтеза и являться полноценным источником энергии.

**Список литературы:**

1. Савенкова Д. Госкомиссия по запасам: газа в России хватит на 90 лет – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/06/02/978454-gaza-hvatit> (дата обращения 27.03.2024)
2. Героева А. ВИЭ в России: медленный рост – URL: [https://www.vedomosti.ru/ecology/science\\_and\\_technology/articles/2022/04/29/920410-vie-v-rossii-medlennii-rost](https://www.vedomosti.ru/ecology/science_and_technology/articles/2022/04/29/920410-vie-v-rossii-medlennii-rost) (дата обращения 27.03.2024)
3. Барбарино М. Пылающая плазма – URL: <https://www.iaea.org/ru/energiya-termoyadernogo-sinteza/pylayushchaya-plazma> (дата обращения 28.03.2024)
4. Мартишкин Ю.В. Методы и системы магнитного управления плазмой в токамаках / Ю.В. Мартишкин, П.С. Коренев, А.А. Прохоров, Н.М. Карцев, М.И. Патров. – М.: Красанд, 2021. – 528 с.
5. Гришина И.А. Физика плазмы и плазменные методы / И.А. Гришина, В.А. Иванов // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10. – №3. – С. 234-255.
6. Готт Ю.В. На пути к энергетике будущего / Ю.В. Готт, В.А. Курнаев. – М.: НУЯУ МИФИ, 2017. – 292 с.
7. Инжекция нейтрального луча - URL: [https://ru.wikibrief.org/wiki/Neutral\\_beam\\_injection](https://ru.wikibrief.org/wiki/Neutral_beam_injection) (дата обращения 28.03.2024)
8. Проект ITER как энергетическая надежда человечества – URL: <https://expert.ru/nauka/proekt-iter-kak-energeticheskaya-nadezhda-chelovechestva/> (дата обращения 28.03.2024)
9. Филиппова А. Солнце в пончике – URL: <https://myatom.ru/metromozg/sun/> (дата обращения 28.03.2024)
10. Бельченко Ю.И. Возможная схема инжектора атомного пучка для нагрева плазмы и генерации тока в токамаке TRT / Ю.И. Бельченко, А.В. Бурдаков, В.И. Давыденко, А.И. Горбовский // Физика плазмы. – 2021. Т. 47. – №11. С. – 1031–1037.
11. Лукша О.И. Разработка коллектора с многоступенчатой рекуперацией для гиротрона / О.И. Лукша, П.А. Трофимов // Радиотехника и электроника. – 2020. Т. 65. – №8. С. – 813-819.
12. Лукша О.И. Моделирование в гиротроне 4-мм диапазона длин волн с многоступенчатой рекуперацией / О.И. Лукша, П.А. Трофимов, А.Г. Малкин // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. Т. 1. – №5. С. – 551– 555.