

УДК 621.039

РЕАКТОР СИНТЕЗА НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ

Котов В.М.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Работа посвящена проблеме создания ядерных энергетических реакторов на основе реакций синтеза легких элементов. В настоящее время эта проблема прорабатывается в вариантах термоядерных реакторов, работающих с высокотемпературной плазмой. В таких реакторах плазма изолируется от стенок реакционной камеры с помощью магнитного поля. Даже в перспективных проектах термоядерных реакторов температурный режим далек от условий обеспечения оптимальных сечений взаимодействия исходных ядер. Несмотря на многолетние работы задача эффективной изоляции плазмы решается с трудом. Растут размеры реакционных камер, прогнозируемые затраты на создание эффективного реактора, даже в варианте с дейтерий-тритиевой реакцией, имеющей максимальное сечение и минимальную энергию взаимодействующих ядер. В статье рассмотрен вариант реактора синтеза, основанный на взаимодействии встречных пучков ионов в тороидальном магнитном поле. Такое решение обеспечивает снижение затрат на инициацию реакции, решает задачу эффективного удержания взаимодействующих ядер в реакционной камере. На примере реакций $D-D$, $D-T$ и $D-^3He$ показаны реакторы на их основе с малыми потерями энергии и небольшими габаритами.

ВВЕДЕНИЕ

Преимущества реакций синтеза легких ядер в отношении количества выделяемой энергии на единицу массы топлива, экологических свойств в ходе работы и в долговременных последствиях перед реакциями деления тяжелых ядер (тем более сжиганием органического топлива) хорошо известны. Однако, практическое использование данных реакций столкнулось со многими трудностями. В области ядерного оружия применение термоядерных зарядов удалось реализовать, хоть и позже, но достаточно быстро.

Исследование возможностей реализации мирного использования реакций синтеза затянулось на многие десятилетия, несмотря на огромные финансовые вложения ряда стран – участниц. Причем ожидаемые результаты выглядят не блестяще по соотношению затрат к получаемому эффекту [1].

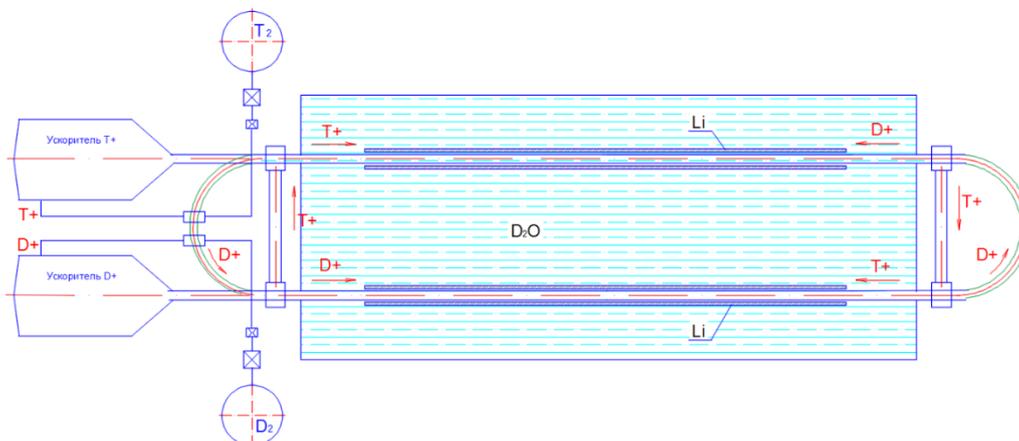
Особенностями проводимых разработок проектов реакторов синтеза является реализация подобию используемых в них реакций реакциям в недрах звезд, проходящих при высоких температурах – создание

так называемых управляемых реакций термоядерного синтеза. В настоящее время исследования ведутся по нескольким направлениям. Основным можно считать реализацию термоядерной реакции в магнитном поле, сдерживающем в заданном объеме плазму. Предлагаемые варианты конфигурации магнитного поля существенно отличаются друг от друга [2–4]. Достаточно интенсивно ведутся работы с использованием лазерного излучения для нагрева до значимой величины мишени, содержащей исходные нуклиды [5], работы по инерционному сжатию мишеней [6].

Рассмотрим возможности пути, основанном на отходе от прямого копирования природных процессов – создании реактора на встречных пучках реагирующих компонент.

1. ОСОБЕННОСТИ РЕАКТОРА НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ

Возможная схема реактора на встречных пучках (рисунок 1) и некоторые характеристики этого реактора представлены в [7].

Рисунок 1. Схема линейного $D-T$ реактора на встречных пучках ионов

В данном реакторе взаимодействие ядер дейтерия и трития происходит на двух линейных участках. Линейные участки окружены слоем лития (вблизи поверхности реакционных каналов) и тяжелой водой. Это способствует эффективному взаимодействию нейтронов с литием и получению, в конечном счете, сырьевого трития.

Возврат ядер дейтерия и трития с выхода одного участка на вход другого участка проводится в магнитном поле. Скорость трития в каналах реактора устанавливается отличной от скорости дейтерия, что способствует возможности разделения ядер дейтерия и трития в магнитном поле.

Вероятность взаимодействия дейтерия с тритием зависит от плотности потоков их ионов. Поэтому, для получения высокой скорости взаимодействия исходных ядер в реакции синтеза при заданном потоке ионов (того и другого типа) желательно использовать пучки ионов с достаточно малым поперечным сечением потока ионов. Рассмотрим потенциальные достоинства и недостатки данной схемы реактора синтеза.

1.1 Достоинства реактора на встречных пучках

Важным достоинством данной схемы, в отличие от термоядерных реакторов, является получение строго заданного типа реакции на ядрах различного типа, таких, как D-T и D-³He. Это важно в большей степени для реакции D-³He. В термоядерном реакторе на смеси D и ³He будут идти три типа реакций: D-D, D-³He и ³He-³He. Реакция D-D будет «поставлять» в такой реактор нейтроны, ухудшающие экологическую чистоту «основной» реакции - D-³He. В реакторе на встречных пучках будет происходить только заданная реакция, обусловленная типом ядер во встречных пучках.

Достоинством приведенной схемы является простота реакционного пространства, окружающего прямолинейные участки со встречными пучками. Отсутствие магнитной системы в зоне реакции позволяет оптимизировать получение энергии из потока нейтронов и производство трития.

В данной схеме аналогом разогрева плазмы в термоядерном реакторе является использование ускорителей ионов. По эффективности процесса получения высоких скоростей ионов схема на встречных пучках имеет определенные преимущества, особенно учитывая тот факт, что ускоренные ионы будут многократно обращаться в реакционной зоне до взаимодействия. В термоядерном реакторе необходимо проводить мгновенный разогрев всего количества топлива в реакционной камере.

1.2 Недостатки приведенной схемы

Определенным недостатком приведенной схемы является ее сложность – наличие четырех магнитных разделителей на каждый тип ионов. Для эффективной работы реактора требуется совместная регулировка параметров работы всех разделителей потоков ионов.

Наибольший недостаток приведенной схемы является электрическое и магнитное взаимодействие ионов исходных продуктов. Большие силы, действующие на ионы в направлении вывода их из пучка, связаны с высокой требуемой плотностью ионов. По оценкам, скорость выхода из пучка может на несколько порядков превышать скорости ионов в продольном направлении (расчеты см. в гл. 4.4).

Приемлемые характеристики реактора синтеза на основе D-D может обеспечивать подача напряжения на корпус, ограничивающий потоки ионов. При отсутствии такого потенциала пучки ионов с заданными характеристиками создать невозможно. Создание корпуса под электрическим потенциалом, изоляция его от других элементов реактора, усложняют конструкцию, требуют создание схемы регулировки напряжения в соответствии с параметрами работы реактора. Особенно на режимах с изменением мощности реактора.

2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО РЕАКТОРА НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ

Совершенствование линейного реактора на встречных пучках с целью уменьшения до нуля компенсационного потенциала на корпусе, ограничивающем потоки ионов, возможно на основе особенности работы разрабатываемых термоядерных реакторов. Таким решением является ввод электронов в потоки ионов с равной плотностью зарядов. Для устранения процессов слияния ионов с электронами необходимо обеспечить различие скоростей ионов и электронов на уровне большей энергии ионизации атомов. Естественно, что поперечные сечения потоков ионов и электронов должны быть равными и сопряженными в пространстве.

2.1 Достоинства

Ввод в поток ионов электронов с равной плотностью и поперечным сечением потоков обеспечивает отсутствие электрического потенциала на участках проведения ядерных реакций.

2.2 Недостатки

Недостатком такого решения является усложнение систем разделения потоков ионов за счет необходимости введения системы разделения потоков ионов и потоков электронов. Более того, отсутствие электронов в местах перемещения ионов от одного прямолинейного участка к другому прямолинейному участку создаст высокий потенциал в данных местах. А как создать одинаковые плотности ионов и электронов на криволинейных участках поворота ионов в магнитном поле не совсем ясная задача.

Если на участках поворота поддерживать плотность потока ионов за счет высокого потенциала на ограничивающем корпусе, то усложняются конструкторские решения, усложняется задача поддержания необходимого потенциала в переходные периоды.

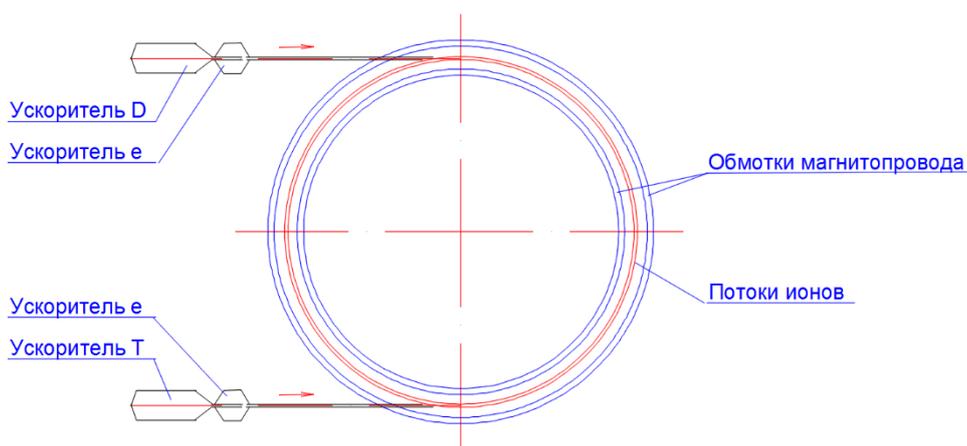


Рисунок 2. Схема D–T реактора на встречных пучках ионов на основе токамака

3. РЕАКТОР НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ В ТОКАМАКЕ

Проблему поддержания встречного движения реагирующих ионов, присущую реактору с прямолинейными реакционными участками, можно устранить используя схему удержания плазмы в тороидальном магнитном поле. Схема основных элементов такого реактора представлена на рисунке 2.

Реактор содержит тороидальный магнитопровод с малым поперечным сечением магнитного потока в сравнении с магнитопроводом токамака термоядерного реактора. Теоретически, для обеспечения необходимой траектории ионов, сечение магнитного потока может быть лишь немного большим сечения потоков ионов. Однако, для передачи тепловой энергии реакции синтеза, необходимо иметь достаточно большую внутреннюю поверхность стенок полости магнитного потока.

Для устранения проблем с высоким потенциалом на поверхности вводимых пучков ионов заданного сечения ускорители ионов сопряжены с ускорителями электронов.

На рисунке 2 не представлены такие элементы, как внутренняя герметичная стенка полости магнитопровода, системы обеспечения герметичности, сбора продуктов реакции, и многое другое, не относящееся к основам технологии работы данного реактора.

3.1 Потенциальные достоинства тороидальной конструкции

Потенциальные достоинства реактора на встречных пучках на основе токамака в сравнении с линейным вариантом хорошо видны из сравнения рисунков 1 и 2. Это простота конструкции, меньшее количество элементов, малые габариты.

В тороидальной конструкции обеспечивается автоматическая стабилизация траектории пучков ионов и электронов по оси тора.

3.2 Сравнение термоядерного реактора и реактора на встречных пучках на основе токамака

Процессы в термоядерном реакторе и реакторе на встречных пучках на основе токамака имеют существенные отличия.

В термоядерном реакторе инициация реакции синтеза осуществляется за счет разогрева исходных продуктов. В ходе разогрева исходные ядра получают существенный разброс по энергии, векторам скоростей.

В современных проектах предварительный разогрев обеспечивает для пары взаимодействующих ядер максимальные скорости меньше, чем требуется для получения максимального сечения реакции.

В реакционном объеме в реакторах с различными ядрами (D–T, D–³He) присутствуют ядра обеих типов. Столкновения, требуемые для необходимой реакции происходят частично. Присутствуют неосновные продукты реакции. В реакторе D–³He будет существовать реакция D–D с получением нейтронов, ухудшающая экологические характеристики основного процесса.

Удержание исходных продуктов в рабочем объеме для термоядерного реактора усложняется наличием ядер, вектор скорости которых направлен к стенке. Для получения необходимых параметров удержания требуется большой объем реакционной полости.

Габариты реакционной полости задают большие значения мощностей, требуемых для разогрева плазмы и для получения требуемых напряженностей магнитного поля токамака.

Наличие разброса векторов скоростей исходных ядер и продуктов реакции требует создания дополнительных корректирующих магнитных полей, усложняющих конструкцию реактора. Плазма токамака подвержена большому количеству неустойчивостей, турбулентна по своей природе. Хотя теория и численное моделирование процессов предсказывают или объясняют ряд основных явлений, сегодня нет возможности полностью рассчитать токамак [8].

В реакторе на встречных пучках инициация осуществляется за счет применения ускорителей ионов.

Проводится столкновение реагирующих ядер со скоростью, обеспечивающей максимальное (или оптимальное по ряду причин) сечение реакции.

Проводится строго заданная реакция. В реакторе $D-^3He$ будут отсутствовать отрицательные для экологии эффекты.

В реакторе на встречных пучках удержание исходных ядер осуществляется на заданной траектории без особых проблем.

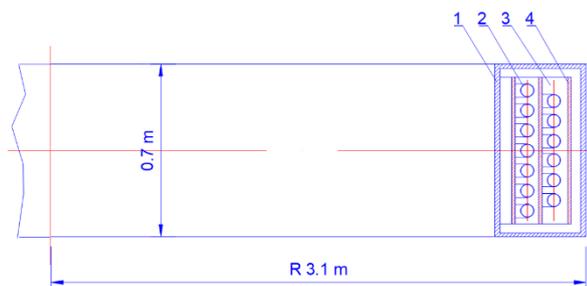
Удержание продуктов реакции в реакционной полости такого реактора для поддержания температуры плазмы не требуется. Наоборот, желательно, чтобы они уходили на стенки камеры.

Взаимодействие нейтронов с литием для получения трития в реакциях $D-D$ и $D-T$ в термоядерных реакторах и реакторах на встречных пучках имеет схожие проблемы. Меньшие габариты катушек магнитопровода для реакторов на встречных пучках облегчают решение этой задачи.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕМОСТРАЦИОННОГО РЕАКТОРА

4.1 Конструктивные особенности

Особенность реакторов на встречных пучках ионов в тороидальном магнитном поле является малое поперечное сечение потоков ионов, и возможность снижения благодаря этому затрат энергии на создание требуемой напряженности магнитного поля. Однако, малая поверхность окружающей рабочую полость корпуса не обеспечивает возможность передачи тепловой энергии к теплоносителю. Требуется компромисс.



1 – корпус реактора, 2 – канал реактора (корпус, обмотки магнитопровода), 3 – теплоноситель (вода), 4 – литиевый поглотитель нейтронов

Рисунок 3. Элементы многотвиткового реактора с максимальной мощностью 100 МВт

В любом случае, потребуется увеличение отношения диаметра траектории пучков ионов (внешнего диаметра) к диаметру поперечного сечения корпуса рабочей полости. Здесь возможны два пути:

- увеличение внешнего диаметра стенки при заданном диаметре поперечного сечения пучка ионов;
- увеличение числа рабочих полостей с индивидуальными реакционными полостями;

– создание змеевиковой конструкции, обеспечивающей приемлемые габариты реактора.

На рисунке 3 представлен вариант демонстрационного змеевикового тороидального реактора на встречных пучках ионов тепловой мощностью 100 МВт.

4.2 Расчет тепловой мощности

Максимальную мощность канала Wl такого реактора можно оценить по следующей формуле:

$$Wl = Ws + Wv,$$

где: Ws – допустимое энерговыделение на поверхности стенки канала от ядер – продуктов реакции; Wv – энерговыделение в воде от замедления нейтронов.

Примем для реактора $D-T$ $Ws = 0,5$ МВт/м², и $Wv = Wn * E\gamma / Ea = 2,0$ МВт/м².

Здесь: Wn – энергия нейтронов, получаемая в реакции, Ea – энергия ядер гелия.

Соответственно, допустимое значение энергии, принимаемой в расчете на единицу поверхности, составит 2.5 МВт/м².

Для учета энергии получаемой в результате реакций нейтронов с литием и количества получаемого трития необходим точный нейтронно-физический расчет на основе конструкции элементов реактора, изотопного состава лития. Особенностями процесса является то, что реакция нейтронов с 6Li – экзотермическая, а реакция с 7Li – пороговая, эндотермическая, но зато, с образованием дополнительного нейтрона в ходе реакции.

4.3 Расчет динамики работы реактора

Для определения характеристик такого реактора можно использовать конечно-разностное решение уравнения динамики реакции с помощью компьютерных программ. Основа решения на языке QBasic представлена ниже:

```

For t = 0 to H
  Nt = Nt + Id - Ub
  Ver = Nt * Sr / Sech
  In = In + Id - Ub
  Ub = Ver * In
  W = Ub * Er
  x = (V / Nt) ^ 0.3333
Next t
    
```

где: t – текущее время работы реактора, сек; H – длительность работы, сек; Id – ток ускорителя, ядер/сек; Nt – ток «прямых» ионов в реакционной камере, ядер/сек; Ub – скорость взаимодействия, ядер/сек; In – ток «встречных» ионов в реакционной камере, ядер/сек; Ver – вероятность взаимодействия одиночного ядра; Sr – сечение реакции, см²; $Sech$ – поперечное сечение пучка ионов, см²; Er – энергия выделяемая в одном акте реакции, Дж; W – мощность реактора, Вт; V – объем, занимаемый пучком ионов в реакционной камере, см³; x – среднее расстояние между ионами в пучке, см.

На основе данных, представленных на рисунке 3, в таблицах 1 и 2 приведены расчетные характеристики реакторов $D-D$, $D-T$ и $D-^3He$ с мощностью на стационарном режиме, равной 100 МВт.

Таблица 1. Характеристики демонстрационного реактора на встречных пучках

№	Параметр	Значение
1	Длина окружности траектории пучков ионов, м	18,9 * 13
2	Радиус поперечного сечения корпуса, м	0,025
3	Площадь поверхности реакционной камеры, м ²	38,0
4	Расчетный тепловой поток Ws, МВт/м ²	0,5
5	Расчетный тепловой поток Wv реактора D-T, МВт/м ²	2,0
6	Сечение медного провода обмотки тороида, мм x мм	5 x 15
7	Число витков обмотки, шт.	49000
8	Сопротивление обмотки, Ом	1,86
11	Ток в обмотке магнитопровода, А	7300
12	Магнитная индукция, Тесла	1,84
13	Мощность потерь в обмотке, МВт	100,0

На рисунке 4 приведены данные для работы реакторов с максимальным сечением реакций. Для реакторов D-D в этом случае получается высоким значение мощности ускорителей.

Для реакции D-D имеется пологая зависимость сечения при изменении скорости столкновения компонент. Были проведены расчеты для варианта этого реактора с уменьшением энергии столкновения с 2 МэВ до 0,14 МэВ. Динамика модифицированного реактора осталась практически неизменной. При небольшом увеличении тока ускорителей их мощность снизилась в 6,4 раза.

При выбранных значениях токов ускорителей и поперечных сечений пучков ионов в реакторах D-D происходит наибольшее накопление ядер в реакционном пространстве к завершению 6-ти минутной работы, когда его мощность является стационарной.

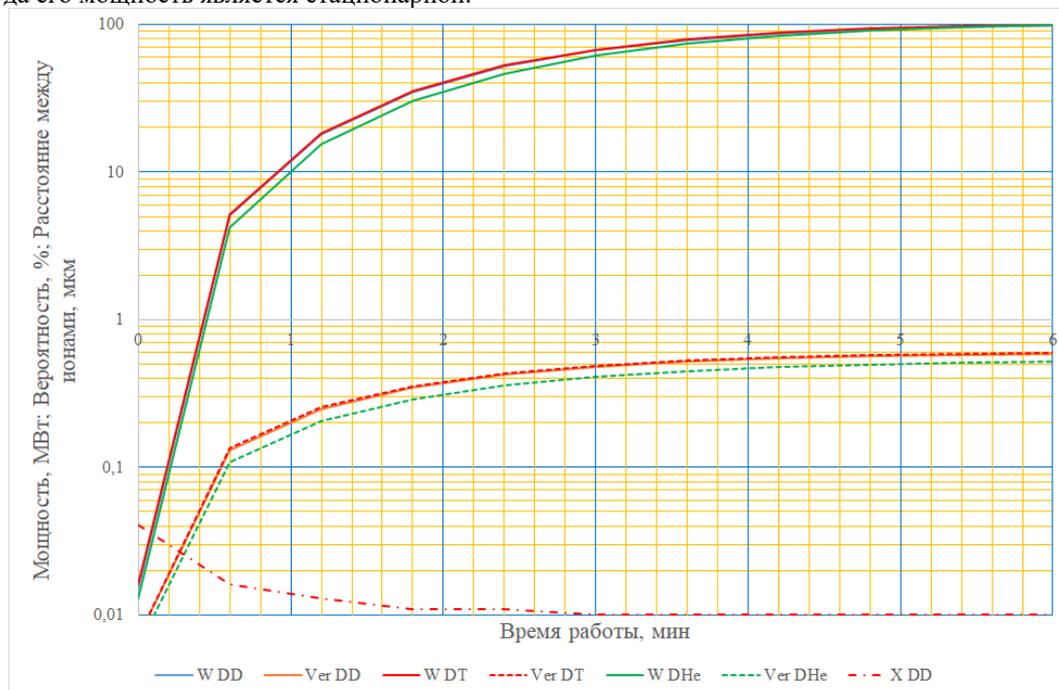


Рисунок 4. Изменение мощности реакторов D-D, D-T, D-³He в ходе работы

На стационарной работе, после выхода на заданный уровень мощности, необходимо поддерживать ток ускорителей равным величине убыли ионов (в том числе от прочих процессов) в результате осуществления заданных реакций.

Таблица 2. Параметры реакторов D-D, D-T, D-³He

Параметр \ Реакция	D-D 1	D-D 2	D-T	D- ³ He
Сечение реакции, барн	0,2	0,1	5,0	0,8
Поперечное сечение пучка, см ²	1,0		5,0	1,0
Ток ускорителя, А	28,9	32,06	5,97	5,91
Энергия ионов, МэВ	1,0	0,14	0,06	0,25
Мощность ускорителя, МВт	28,9	4,5	0,358	1,48
Максимум концентрации, моль	0,049	0,069	0,01	0,0106
Выход на стационар, минут	6,0		4,8	5,4

При отключении ускорителей ионов мощность реактора будет спадать со скоростью равной убыли реагирующих ядер в соответствии с их плотностью в конкретный момент времени. Эта характеристика представлена на рисунке 5. Спад мощности реакторов до уровня 1-2% от стационарного значения происходит в течение 25 минут. Различия характеристик спада для различных реакций незначительны. Максимальные различия наблюдаются к концу спада. При этом, максимальная мощность принадлежит реакции D-D с минимальным сечением взаимодействия, минимальная – реакциям D-T и D-D с максимальным сечением взаимодействия.

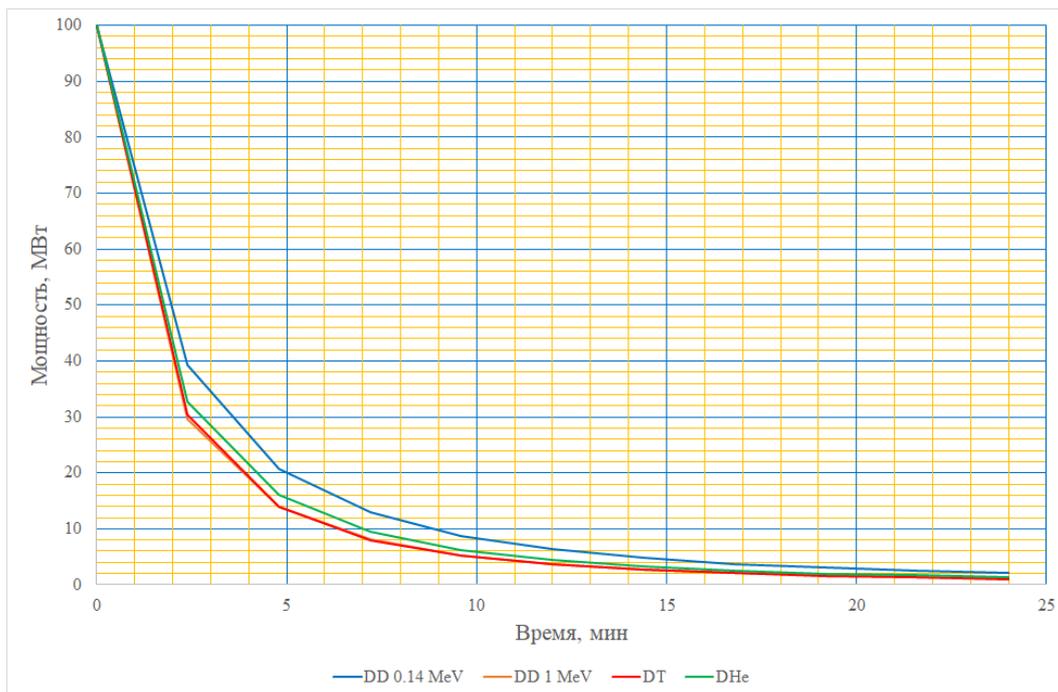


Рисунок 5. Изменения мощности при выходе из стационарного режима

В представленном демонстрационном реакторе выделяемая мощность за счет реакции синтеза D–T равна мощности, расходуемой на питание тороидального электромагнита. При этом магнитная индукция равна 1,84 Тесла, что меньше принимаемой в проектах термоядерных реакторов. Выход на большие значения магнитной индукции (если потребуется) и меньшие потери энергии на питание магнита возможен при использовании сверхпроводящей обмотки магнита. Тепловые потери при поддержании криогенной температуры обмотки оцениваются значительно меньшими, чем потери мощности в медной обмотке.

Реакторы D–D с малым сечением взаимодействия имеют приемлемые технические характеристики и могут представлять интерес в качестве поставщиков сырьевого ³He для экологически чистых реакторов D–³He, которые могут получить широкое применение на транспортных средствах, вплоть до авиационных.

Реакторы D–T обеспечивают собственное расширенное воспроизводство трития за счет реакции нейтронов с литием.

4.4 Оценка сил электромагнитного взаимодействия ионов

Расчет действия зарядов в пучке ионов (при отсутствии электронов в пучке) на ион внешнего слоя проводился в грубом приближении, что поток ионов расположен линейно на бесконечно длинной оси траектории. Сила, действующая на единичный заряд q будет определяться в соответствии с [9]:

$$F = C_L / 2 * \pi * \epsilon * x * q,$$

где: C_L – линейная плотность зарядов, кулон/метр; ϵ – электрическая постоянная; q – заряд электрона, кулон; x – расстояние от единичного заряда до оси.

Значения энергии, получаемой ядром дейтерия при движении от поверхности потока ионов к стенке тороидальной камеры, для вариантов работы реактора на стационарном уровне мощности (по таблице 2) представлены в таблице 3. Там же показаны приведенные значения давления в потоке ионов, соответствующее их плотности при температуре 300 К.

Таблица 3. Характеристики поля потока ионов в стационарном режиме

Тип реактора \ Параметр	D–D max	D–D optim	D–T	D– ³ He	Ускоритель D–T
Энергия вывода дейтерия, МэВ	621255	874829	52056	159380	0,00016
Давление приведенное, ата	0,045	0,063	0,0018	0,0097	—

Энергия, получаемая ионами в поле их пучка в тороиде, превышает на много порядков максимальную энергию синтеза рассмотренных реакций. Понятно, что такой вариант потока ионов в тороидальном, и любом другом типе реактора, не работоспособен. При предлагаемом совместном движении ионов реагирующих ядер с электронами действие зарядов ионов будет нейтрализовано.

В потоке ионов дейтерия на выходе ускорителя энергия выхода внешнего иона при той же геометрии канала незначительна. Это определяется свободным движением ионов в отличие от их движения в замкнутом торе, соответственно их малой плотностью.

Отметим, что сила взаимодействующих токов ионов противоположного направления движения также приводит к выносу ионов из их потока. Однако, величина этой силы на несколько порядков меньше электростатической силы.

5. ПРОБЛЕМОЙ для тороидальных реакторов со встречными пучками ионов может явиться передача тепловой энергии на стенки каналов при остановке реактора в случае высокой доли продуктов реакции, захваченных магнитным полем тороида. В этом случае возможные решения:

- ввод делителей потоков ионов различных энергий в некотором разрыве траектории ионов с возвратом «низкоэнергетических» ионов (и электронов) на рабочую траекторию;
- ограничение интеграла мощности при непрерывной работе реактора.

Минимальный эффект этого процесса будет в реакции D–T, где доля энергии, уходящей с нейтронами непосредственно в теплоноситель наибольшая.

Пока нет уверенности в том, что распределение ядер-продуктов реакции будет равномерным по азимуту относительно оси пучков ионов. В случае неравномерности будет снижена допустимая мощность реактора при выбранной его геометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов В.В., Пономарев Л.И. Ядерные проблемы термоядерной энергетики. // Атомная энергия. Т.124, вып. 2, февраль 2018.
2. Б.Б. Кадомцев. От МТР до ИТЕР, // УФН. 1996. Т. 166, № 5, С. 449-458.
3. Л. Спитцер, Стелларатор. // УФН. 1960. Т. LXXI, вып.2, С. 327-338.
4. В.Тучков. Соперники токамака, //news.students.ru/index.php?newsid=4015
5. А.М. Прохоров, С.И. Ансимов, П.П. Пашинин. Лазерный термоядерный синтез // УФН. 1976. Т. 119 вып. 3, С. 401-424.
6. Калмыков Ю.К., Комин А.В., Кривошеев М.В. Термоядерные реакторы с инерционным удержанием, Обзор ОСА-65. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1984.
7. Котов В.М., Котов С.В. Реакторы синтеза с использованием ускорителей ионов. // Вестник НЯЦ, 2019, вып. 4, с. 91-97.
8. Молчанов П.А. История научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза. Электронный ресурс. <http://docme.ru/download/178483>. Дата обращения 04 12 2018.
9. Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов. // М. Издательство «Наука», 1968 г. 939 с.

ҚАРАМА-ҚАРСЫ ШОҚТАРДАҒЫ СИНТЕЗ РЕАКТОРЫ

В.М. Котов

ҚР ҰҰО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Бұл жұмыс жеңіл элементтер синтезінің әсері негізінде ядролық энергетикалық реакторларды құру проблемасына арналған. Бүгінгі күні бұл проблема жоғары температуралық плазмамен жұмыс істейтін термоядролық реакторлар түрінде пысықталып жатыр. Бұндай реакторларда плазма магниттік өрістің көмегімен реакциялық камераның қабырғаларынан оқшауланады. Тіпті термоядролық реакторлардың перспективалық жобаларында температуралық режим бастапқы ядролардың өзара әрекеттесуінің оңтайлы қимасын қамтамасыз ету жағдайынан алыс. Көп жылғы жұмыстарға қарамастан, плазманы тиімді оқшауландыру міндеттері қиындықпен шешілуде. Тиімді реакторды өзара әрекеттесуші ядролардың максималды қимасы және минималды энергиясы бар, дейтерий-тритийлі реакция нұсқасында да құру үшін болжамдалған шығындар, реакциялық камералардың өлшемдері өсуде. Мақалада иондардың қарама-қарсы шоқтарының тороидті магниттік өрістерде өзара әрекеттесуіне негізделген синтез реакторының нұсқасы қарастырылған. Бұндай шешім реакцияның бастамалауына арналған шығындарды төмендетуді қамтамасыз етеді, өзара әрекеттесуші ядроларды реакциялық камерада тиімді ұстау міндетін шешеді. **D–D**, **D–T** және **D–³He** реакциялары мысалында, осылардың негізінде энергияны аз жоғалтатын және габариттері үлкен емес реакторлар көрсетілген.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема ядерного реактора синтеза легких элементов на основе взаимодействия встречных пучков ускоренных ионов со стабилизацией их траектории в магнитном поле тороидального магнитопровода и совместном движении с электронами.

Проведено сравнение достоинств и недостатков предложенной схемы со схемой термоядерного реактора на базе токамака. Показаны потенциальные преимущества предложенного решения.

Рассмотрен вариант «демонстрационного» реактора с максимальной мощностью 100 МВт, проведены расчеты его характеристик на основе трех типов реакции: D–D, D–T и D–³He. Показано, что реактор D–D с энергией столкновения исходных ядер 2,0 МэВ (максимальное сечение реакции) требует много больших потерь в ускорителе, чем с энергией 0,14 МэВ.

Имеются задачи, требующие экспериментальных проработок. Можно ожидать, что их решение не будет столь долговременным и дорогостоящим, как работы по термоядерной тематике.

FUSION REACTOR ON COLLIDING BEAMS

V.M. Kotov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

The paper is devoted to the problem of constructing nuclear power reactors based on the synthesis of light elements. This problem is currently subject to assessment under options of thermonuclear reactors operating with high-temperature plasma. In such reactors, plasma is isolated from the walls of the reaction chamber using a magnetic field. Even in advanced designs of thermonuclear reactors, temperature regime is far from the conditions for ensuring optimal interaction cross sections of the source nuclei. Despite many years of work, the task of efficient plasma isolation is difficult to solve. The size of the reaction chambers increases, predicted costs of constructing an effective reactor, even in version with the deuterium-tritium reaction, which has a maximum cross section and minimum energy of interacting nuclei. The article considers a version of the fusion reactor based on the interaction of colliding ion beams in a toroidal magnetic field. This solution provides a cost cutting to trigger the reaction, address the problem of effective retaining of interacting nuclei in the reaction chamber. An example with D-D , D-T and $\text{D-}^3\text{He}$ reactions shows reactors based on them with low energy losses and small dimensions.