

УДК 621.039

РЕАКТОРЫ СИНТЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

Котов В.М., Котов С.В.

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

Ядерные реакторы на основе деления тяжелых ядер были созданы спустя десятилетие после открытия деления урана под действием нейтронов. Попытки создания реакторов на основе синтеза легких ядер продолжают более семи десятилетий. Основное направление их осуществления повторяет природные технологии – осуществление реакций под действием высоких (звездных) температур. Это направление столкнулось с массой проблем, и в современном понимании требует для своей реализации огромных вложений. Имеются разработки на основе использования ускорительной техники. В предлагаемой работе проведена оценка возможности создания реакторов синтеза с использованием встречных пучков ионов реакций D-D, D-T, D-³He. Показаны технические решения применимые для их осуществления, преимущества таких реакторов перед термоядерными реакторами, возможности наработки для них топлива и возникающие проблемы.

ВВЕДЕНИЕ

Большие ресурсы топливного сырья и отсутствие долгоживущих радионуклидов среди продуктов реакции являются важнейшими потенциальными достоинствами энергетики на основе синтеза легких ядер. В настоящее время основой ее реализации считаются термоядерные установки с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы. Основные усилия направлены на создание дейтерий-тритиевых реакторов, имеющих наибольшее сечение реакции взаимодействия при минимальной температуре. Заметную роль имеют инерциальные установки с лазерным или ионным сжатием мишеней.

Несмотря на более, чем 60-летнюю историю таких работ, успехи весьма скромны [1], более того, в настроении ведущих специалистов проявляется обоснованный скепсис в отношении работоспособности термоядерных реакторов [2].

Настоящее предложение является развитием схем реакторов синтеза с использованием ускорительной техники. Простейшая из них основана на взаимодействии пучков ускоренных ионов с твердой мишенью. При всей простоте такой схемы она не работоспособна из-за высоких потерь энергии ионов на ионизацию материала мишени, т.к. сечение ионизации на несколько порядков превышает сечение реакции синтеза [3].

В модификации данной схемы мишень выполнена в виде взрывчатого вещества, содержащего компоненту реакции синтеза [4]. При взрыве мишень ионизируется, вероятность реакции синтеза увеличивается. Недостатком схемы является цикличность работы, усложняющая установку, далекие от оптимальных параметры плазмы по содержанию ионов реакции синтеза, наличие примесей других ионов и электронов. Другие недостатки данного проекта будут видны в последующих материалах настоящей статьи.

Имеются проекты использования тяжелоионных ускорителей, облучающих мишень с гибридным топливом реакторной схемы «синтез-деление-синтез» [5]. Потенциально такая схема позволяет эффективно

использовать нейтроны обоих типов реакторов, осуществить стационарный режим термоядерной реакции. Однако, и сложности ее реализации, по существу, двойные (или тройные).

ОСНОВА ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

Предлагается реактор с ускорителями на встречных пучках ионов, подобно исследовательским установкам [6]. Идеализированная схема ускорительного реактора синтеза содержит два ускорителя компонента реакции синтеза с пучками ионов, направленных навстречу друг другу в реакционной камере. Пусть один ускоритель ускоряет ядра дейтерия, другой – трития.

Вероятность взаимодействия J ионов можно рассчитать, перенося сечение реакции на одну из компонент, например, тритий, располагая все ядра этой компоненты на одном из сечений камеры:

$$J = N_t \cdot \sigma / S \quad (1)$$

где: N_t – количество ядер трития, находящихся в канале взаимодействия; σ – сечение взаимодействия ядер дейтерия с ядрами трития, см⁻²; S – площадь проходного сечения реакционной камеры, см².

Скорость взаимодействия ядер рассчитаем по формуле:

$$N = I_d \cdot J = I_d \cdot N_t \cdot \sigma / S \quad (2)$$

где: I_d – поток ядер дейтерия входящий в канал взаимодействия, с⁻¹.

Исходные данные и результаты расчета ряда вариантов такого реактора приведены в таблице 1. Приведены значения энергий ионов дейтерия E_d и трития E_t , длины вариантов реакционных камер L , площади проходного сечения реакционных камер S , токи ионов ускорителей I , мощности ускорителей W_{acc} , количество ядер трития в реакционном канале N_t , скорости ионов дейтерия V_D и трития V_T , вероятность взаимодействия ионов на выходе из ускорителя с ионами противоположной компоненты Ψ (отношение скорости взаимодействия в реакционной камере к расходу ионов ускорителя), а также расстояние между ионами трития в реакционной камере Z .

Таблица 1. Характеристики вариантов ускорительного реактора синтеза

Параметры	Варианты				
	1	2	3	4	
Исходные	Ed, эВ	30 000	60 000		
	Et, эВ	30 000	0,5		
	L, м	1,0	5,0		
	S, см ²	1,0	0,02		
	I, ядер/с; ампер	1,25+18; 0,2			
	Y	1,0		340	
Расчетные	W _{ассД} , кВт	6,0	12,0		
	W _{ассТ} , кВт	6,0	0,0		
	N _т , ядер/канал	1,26+12	1,55+15	1,16+19	
	V _Д , км·с	1212	1714		
	V _Т , км·с	989	4		
	W _{трД} , кВт	2,15-8	1,31-3	9,82	3338
	Ψ взаимодей	6,31-12	3,86-7	0,29%	0,95
	Ψ проход	~1,0			
	Z меж трит, МКМ	4,33 (43000 д ат)	0,19 (1900)	9-3 (96)	9-3 (96)

В варианте 1 вероятность взаимодействия ядер дейтерия с ядрами трития очень мала ($6,31 \cdot 10^{-12}$). Соответственно, при энергозатратах на ускорение 12 кВт, мощность реакции синтеза равна $2,15 \cdot 10^{-8}$ кВт.

Анализируя формулу (1) можно сделать вывод о возможности увеличения вероятности взаимодействия при тех же значениях потоков ионов за счет увеличения плотности потоков ядер дейтерия и увеличения количества ионов трития в канале взаимодействия. Увеличение плотности потоков ядер дейтерия можно обеспечить за счет уменьшения радиуса пучка ионов дейтерия, а количества ионов трития в канале можно достигнуть, уменьшая скорость их движения в канале.

Примем сечение пучка ионов дейтерия равным $0,02 \text{ см}^2$, а скорость движения ионов трития в канале близкой к тепловому движению, а также увеличим длину реакционного канала до 5 метров. В данном варианте 2 вероятность взаимодействия повышается на несколько порядков, а мощность реакции синтеза достигает нескольких Ватт. Затраты энергии превышают положительный выход в ~1000 раз. Следует обратить внимание на то, что среднее расстояние между ядрами трития в реакционном канале здесь превышает характерное значение диаметра атома в ~2000 раз.

Следующая возможная модификация заключается в увеличении плотности ядер трития в реакционном канале. В варианте 3 плотность увеличена на четыре десятичных порядка, расстояние между ядрами трития уменьшено в ~20 раз. Вероятность взаимодействия повышается до 0,29%, а мощность реакции

синтеза достигает 9,8 кВт. Важно, что и в этом случае вероятность прохождения ядер через реакционный канал без взаимодействия остается близкой к единице.

Следующей возможной модификацией схемы реактора является введение петель возврата прошедших через реакционный канал ядер на их входы в этот канал. Возможность реализации такого решения основана на высокой вероятности прохождения ядер через реакционный канал без взаимодействия, отработанности схем кольцевого движения заряженных частиц в магнитных полях [6, 4]. В соответствии с вероятностью взаимодействия, полученной в варианте 3, поток ионов в кольцевой петле может превосходить поток от ускорителя в $Y = 100/0,288$ раз. Принимая $Y = 340$ получаем в варианте 4 вероятность взаимодействия в реакции синтеза равной 96%, а мощность реактора равной 3338 кВт.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИОНОВ

Для варианта 4 таблицы 1 был определен электростатический потенциал на внешней границе потока ионов в реакционной камере. Расчет проводился в приближении реакционного канала в виде бесконечного проводника с известной линейной плотностью зарядов по формуле:

$$U = \tau \cdot \ln (r_2/r_1) / (2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon) \tag{3}$$

где τ – линейная плотность зарядов, м^{-1} ; r_2 – расстояние до внешних объектов, м; r_1 – радиус реакционного канала, м; ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

Для варианта 4 таблицы 1 потенциал внешней стенки реакционного канала относительно объекта, удаленного от нее на расстояние 10 м, превысит 90 МВ, а напряженность поля на внешнем радиусе превысит 12000 МВ/м.

При такой напряженности ионы будут вылетать за пределы канала уже на небольшой участке их полета в канале. Для удержания необходимо устанавливать металлические станки канала и поддерживать на них соответствующее положительное напряжение.

Кроме того, будет необходимо поддерживать данный потенциал на границе потока ионов на всем пути следования ионов в реакторе. В устройстве [4] данное положение отсутствует, что говорит о его неработоспособности при требуемой высокой плотности ионов.

Проведены расчеты зависимостей мощности реакции DT синтеза, потенциала на стенках канала и тока ионов в канале от сечения канала при двух вариантах: с постоянным потенциалом и постоянной плотностью тока ионов. Длина канала везде 5 м, энергия ионов дейтерия 50 кэВ, трития – 10 кэВ. Данные представлены на рисунке 1.

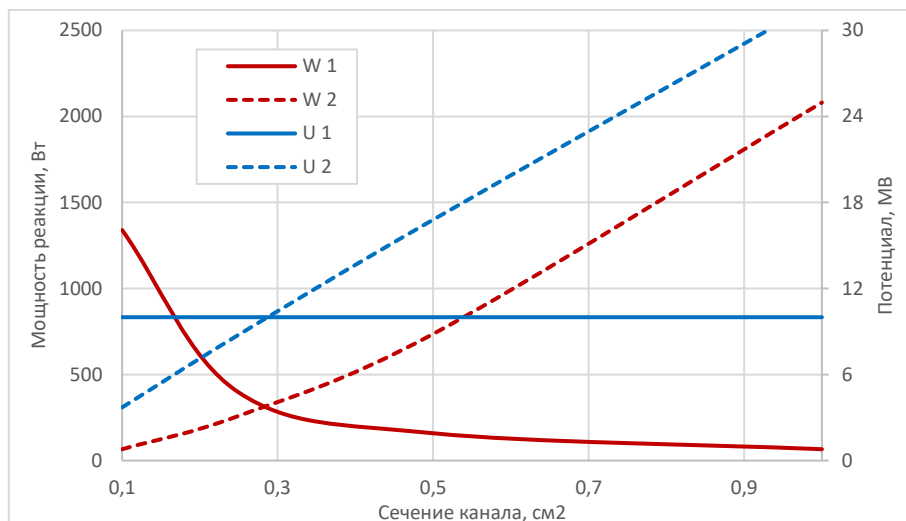


Рисунок 1. Характеристики вариантов канала синтеза D-T с равным потенциалом (1) и равной плотностью ионов (2)

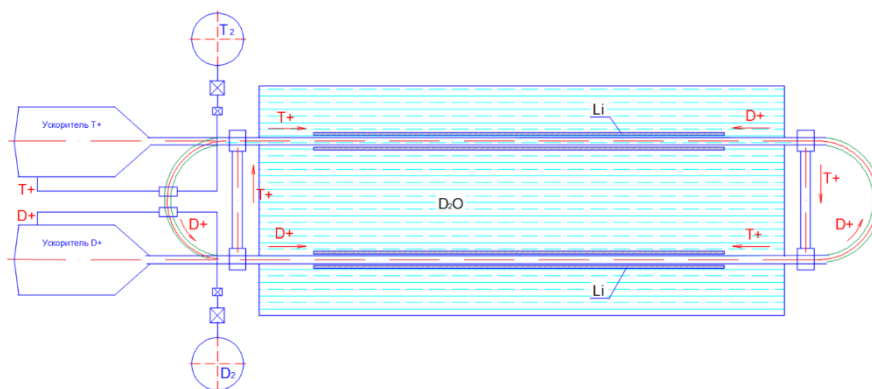


Рисунок 2. Схема двухпетлевого D-T реактора

Видно, что максимальная мощность второго канала 2,08 кВт достигается при сечении канала 1 см². При этом потенциал составляет 32 МВ. Максимальная мощность первого варианта достигается при минимальном сечении канала и составляет 1,34 кВт.

При значениях мощности в обоих вариантах 1,34 кВт потенциал первого варианта меньше потенциала второго примерно в 2,4 раза. При равных потенциалах значения мощностей практически одинаковы. В диапазоне сечений меньших 0,3 см² преимущество у варианта с постоянным потенциалом. В этом диапазоне рассмотрим характеристики других реакторов.

ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА

Схема реактора синтеза представлена на рисунке 2. В левой части схемы расположены ускорители ионов дейтерия и трития. Представленная схема рассчитана на ускорение ионов дейтерия до 50 кэВ, а трития до 10 кэВ. Такие энергии ускорения обеспечивают простоту разделения ионов дейтерия и трития на выходах из реакционных каналов, которое исключает возникновение реакций синтеза вне реакционных каналов (в пространстве магнитных полей).

В потоке ионов дейтерия расположены ионизаторы атомарного дейтерия и атомарного трития. Каждый из них содержит емкость с газообразной компонентой, расходозадающую шайбу и регулятор давления на входе шайбы. Газовые компоненты подаются в ионизатор с расходом равным их расходу на выходе ускорителя и попадают в поток быстрых ионов. Затраты энергии на ионизацию атомов составляют ~30 эВ. Сечение ионизации можно принять равным квадрату диаметра атома ~10⁸ барн. Длина участка, на котором произойдет полная ионизация, при равенстве сечений прохода атомов и быстрых ионов дейтерия не превысит долей микрона. Потеря энергии ионов не превысят 0,05%. Задача вывода вновь образованных ионов к ускорителям решается воздействием на них электрических и магнитных полей, к которым быстрые ионы будут малочувствительны.

Такая технология ионизации легко обеспечит требуемую производительность, исключает необходимость использования дополнительных устройств ионизации (нагревных, лазерных и т.п.).

Петли возврата непрореагировавших быстрых ионов содержат магнитные системы, одни из них обес-

печивают поворот ионов дейтерия (с большей напряженностью магнитных полей и большим радиусом поворота), другие – ионов трития.

Реакционные каналы окружены емкостью с тяжелой водой, обеспечивающей эффективное замедление нейтронов, образованных в реакции синтеза. В тяжелой воде размещаются литиевые поглотители нейтронов, обеспечивающий образование трития. В зависимости от радиуса размещения природного лития относительно реакционной камеры можно менять характеристики взаимодействия с ядрами ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. При малом радиусе ${}^7\text{Li}$ будет поглощать быстрые нейтроны с возвратом медленных нейтронов (вариант большего числа вторичных нейтронов и образования трития), при большем радиусе будет интенсивно идти реакция на ${}^6\text{Li}$ с выделением дополнительной энергии (вариант большей энергии ядерных реакций).

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРОВ СИНТЕЗА

Рассмотрим характеристики реакторов синтеза на основе реакций D-D, D-T, D- ${}^3\text{He}$, имеющих наибольшие сечения взаимодействия исходных компонент при минимальных энергиях взаимодействия. Зависимости сечений взаимодействия от энергии реакции представлены на рисунке 3.

В таблице 2 представлены характеристики данных реакций – исходные и конечные продукты реакции; энергии, уносимые конечными продуктами; вероятности прохождения конечных вариантов реакций и суммарная энергия, выделяемая в ходе взаимодействия исходных компонент.

Видно, что реакция D-D отличается в «худшую» сторону как по сечению взаимодействия, так и по выделяемой в ее ходе энергии. Получаемые в ходе реакций D-D тритий (${}^3\text{H}$) и ${}^3\text{He}$ могут использоваться в реакциях D-T и D- ${}^3\text{He}$, соответственно.

Таблица 2. Характеристики реакций синтеза

№	Исходные	Продукты реакции				ΣE , МэВ	Ψ , %
		ядро	E, МэВ	частица	E, МэВ		
1	D + D	${}^3\text{H}$	1,01	p	3,02	3,65	50
		${}^3\text{He}$	0,82	n	2,45		50
2	D + T	${}^4\text{He}$	3,5	n	14,1	17,6	100
3	D + ${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$	3,6	p	14,7	18,3	100

Получаемые в ходе реакций D-D и D-T нейтроны также могут использоваться для выработки сырьевого трития в реакции D-T. Реакций, в которых может быть получен тритий несколько. Основные из них представлены в таблице 3. В части из них (1, 3, 4) тритий образуется непосредственно. Изотоп ${}^6\text{Li}$ имеет наибольшее сечение захвата нейтронов, ведущее к образованию трития. В тяжеловодном замедлителе получение трития имеет меньший выход за счет малого сечения реакции.

Таблица 3. Характеристики основных реакций получения трития

№	Исходные	η , %	Продукты реакции		σ , барн	E	dE
1	${}^2\text{H} + n$	~0,015	${}^3\text{H}$		0,00046		
2			H	$2 \cdot n$			3,34
3	${}^6\text{Li} + n$	7,52	${}^3\text{H}$	${}^4\text{He}$	945	4,8	
4	${}^7\text{Li} + n$	92,48	${}^3\text{H}$	${}^4\text{He} + n$		-2,47	8,2
5	${}^9\text{Be} + n$	100	${}^6\text{Li}$	${}^4\text{He}$	0,01		
6			$2 \cdot {}^4\text{He}$	$2 \cdot n$	0,1		1,85

В реакциях 2 и 6 происходит умножение числа нейтронов, которые могут произвести тритий. Эти реакции происходят на быстрых нейтронах при превышении исходным нейтроном некоторого порога dE. В этом отношении бериллий является лучшим кандидатом для реализации реакции n2p.

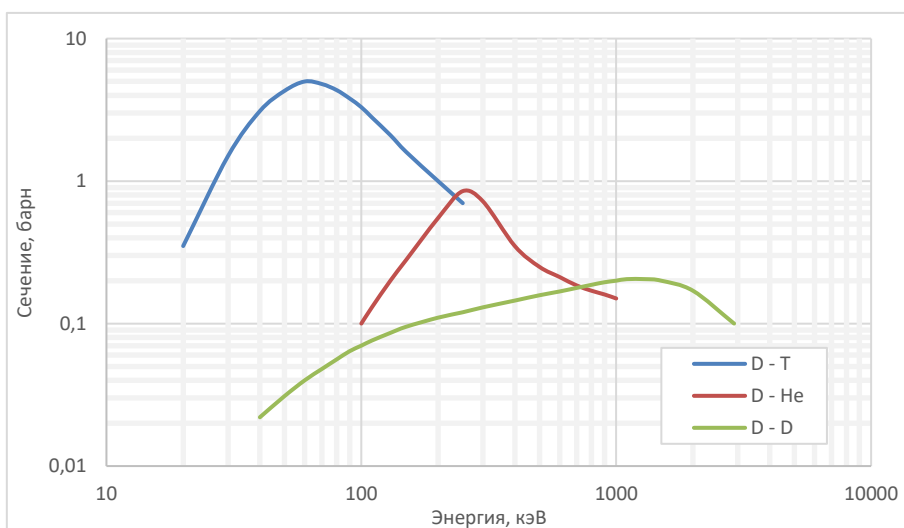


Рисунок 3. Зависимость сечений реакций синтеза от энергии

В таблице 4 приведены значения токов ионов в реакционной камере I , при которых достигаются требуемый потенциал, мощность ядерной реакции в канале W и ток ионов ускорителя I_u , соответствующий числу взаимодействующих ядер.

Таблица 4. Характеристики вариантов трех типов реакторов

Потенциал, МВ	Параметр	D-D	D-He	D-T
10	I , А	34	31,8	27
	W , Вт	82	289	1295
	I_u , мкА	0,126	0,442	1,99
15	I , А	51,2	47,7	40,4
	W , Вт	280	974	4340
	I_u , мкА	0,284	0,994	4,49
20	I , А	68	63,5	54
	W , Вт	656	2297	10360
	I_u , мкА	0,503	1,76	7,94

Следует отметить, что время вывода на стационарный режим при близких к указанным в таблице токах ускорителя будет весьма большим (при равных стационарный уровень будет близким к нулю).

При токе ускорителя I_u , большем стационарного, рост тока реакционной камеры I_k будет определяться выражением:

$$I_k = I_k + I_u \cdot (K - 1) \quad (4)$$

где K – отношение тока ускорителя при выходе на стационар к стационарному току ускорителя. На рисунке 4 показано изменение мощности реакторов при выходе на стационарный уровень при потенциале 10 МВ с током ускорителя равным ~1000 токов стационарного уровня ускорителя D-T (2 мА).

При увеличении тока ускорителей до 10 мА время выхода уменьшится до ~50 минут. Токи ускорителей

и на стационарном уровне можно установить близкими к 2–10 мкА при прерывистом режиме их включения в работу. Это обеспечит унификацию характеристик ускорителей при управления работой ускорителей за счет изменения скважности включения максимальной мощности.

ИСТОЧНИКИ СЫРЬЯ И СВЯЗКА РЕАКТОРОВ СИНТЕЗА

На основе реакторов синтеза, использующих данные реакции, может быть создана энергетика, топливным сырьем для которой являются доступные дейтерий и литий. Первичным реактором в ней будет D-D реактор. Основной целью его работы будет не производство энергии, а наработка топлива для реакторов D-T и D-³He. В ходе одного акта реакции D-D образуются дефицитные 0,5 ядра трития, 0,5 ядра ³He и 0,5 нейтрона, который может направляться на образование трития.

Образование ³He в реакции D-D неуправляемое, постоянное по величине. Выработка трития в реакторе D-D может быть увеличена (незначительно) при установке вблизи реакционной камеры слоя бериллия, в котором порог реакции n2p меньше энергии нейтронов, образующихся в D-D реакции.

Реактор D-T, получив тритий от D-D реактора, может в дальнейшем работать самостоятельно. Высокая энергия нейтронов, образующихся в реакции D-T, позволяет организовать расширенное производство трития. При вовлечении в производство ⁷Li в ходе одной реакции D-T можно получить трития в количестве, достаточном для получения трех и более ядер трития на один исходный нейтрон.

Здесь становятся важными время, затрачиваемое на процесс вывода трития из реактора начиная от момента образования исходного нейтрона (время получения трития), и темп увеличения мощности в одном цикле. Время получения трития можно сравнить с длительностью кампании в реакторах деления, когда

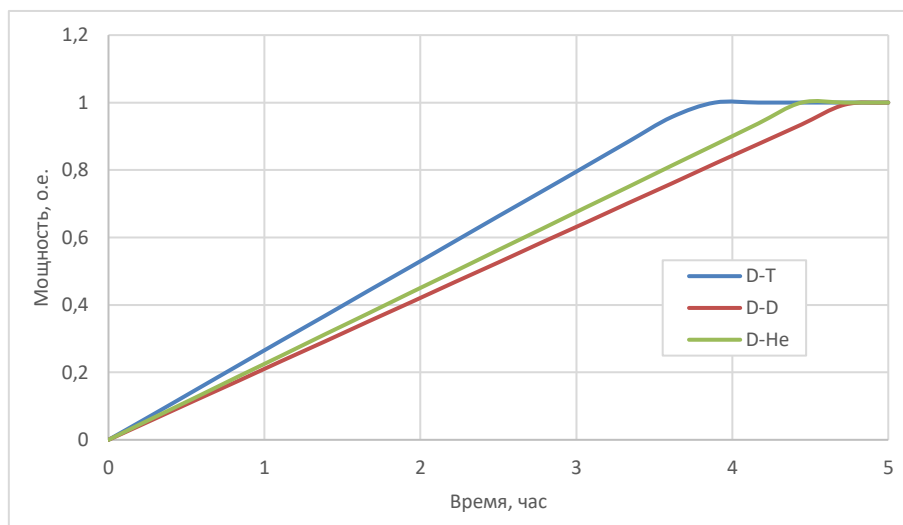


Рисунок 4. Изменение мощности реакторов с потенциалом 10 МВ при выходе на стационарный уровень при токе ускорителей 2 мА

может быть получено вторичное делящееся вещество. Можно оценить, что время получения трития будет много меньше характерных времен кампании реакторов деления. В быстрых реакторах темп воспроизводства обеспечивается на уровне 1–5%. В реакторе D-T он может достигать 100%. Соответственно, темп роста энергетики на реакторах D-T будет много большим темпов роста энергетики на быстрых реакторах.

Для исключения наиболее сложных в техническом отношении D-D реакторов в развитии D-T реакторов, можно в качестве первичного источника трития использовать реакторы деления. Наиболее перспективными в этом отношении являются тяжело-водные реакторы с высоким воспроизводством делящихся веществ. Так, реактор [7] обеспечивает полное использование природного урана и возможность направления до 5% нейтронов на дополнительное (кроме реакции $D+n = T$ в замедлителе) получение трития поглощением в литии.

Примечательно, что реакторы $D-^3\text{He}$ могут использоваться в наиболее безопасном радиационном варианте в малых автономных и транспортных установках. Следует учесть, что в предлагаемом реакторе $D-^3\text{He}$, в отличие от термоядерного реактора, реакция D-D с образованием нейтронов будет невозможна.

Работа реактора D-D будет обеспечивать работу реактора $D-^3\text{He}$ с мощностью, равной 2,5 мощности реактора D-D (не считая энергии, выделяемой при образовании трития). Исходя из данных таблицы 2 несложно определить, что для данного соотношения мощностей число каналов реактора D-D должно быть в 1,41 раз больше числа каналов реактора $D-^3\text{He}$.

Таким образом, предлагаемые реакторы синтеза могут обеспечить свою работу сырьем в виде дейтерия и лития. В начале необходима работа дейтерий-дейтериевого реактора. В полной мере он необходим для работы реакторов $D-^3\text{He}$. При работе реакторов D-D обращение к источникам сырья из реакторов деления и лунного грунта, по всей видимости, будет не целесообразным.

ОБ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Наиболее опасными в радиационном отношении могут быть аварии на реакторах D-T, в котором в реакционных каналах находятся ионы трития. В реакторах D-D тритий хоть и образуется, но в свободном состоянии отсутствует. В ходе образования тритий внедряется в поверхность стенок реакционного канала. В реакторах $D-^3\text{He}$ радиоактивные нуклиды отсутствуют.

Сравним аварийные ситуации реакторов ИТЭР и РС. Трития в вакуумной камере ИТЭР = 450 г = $9 \cdot 10^{25}$

ядер (активность его $5 \cdot 10^6$ Кюри). Тепловая мощность ИТЭР – 3000 МВт.

Трития в канале РС – $1,2 \cdot 10^{19}$ при мощности 2 кВт. При мощности 3000 МВт в реакторе РС будет $2 \cdot 10^{25}$ ядер трития (в 4 раза меньше, чем в ИТЭР).

При определении характеристик аварии следует учесть четыре фактора:

- РС можно делать малой мощности, что невозможно в ИТЭР. Следовательно, масштаб гипотетической аварии с выходом трития в РС в атмосферу будет много меньшим;

- количество трития в реакционных каналах можно дополнительно уменьшить за счет придания в работе РС большей энергии тритию, а меньшей – дейтерию;

- в ИТЭР тритий находится в общей камере, в РС – во множестве реакционных каналов. При аварии в РС полная одновременная разгерметизация всех каналов мало вероятна;

- при аварии на РС можно считать, что первоначально будет потеряно напряжение на стенках реакционных каналов. Следовательно, ионы трития мгновенно будут осажены на этих стенках. Каналы малого сечения при разгерметизации будут наполняться воздухом атмосферы, что будет препятствовать выходу трития.

Особенностью предлагаемого реактора является наличие высоких напряжений на основных его рабочих элементах. Следует стремиться снизить их электрическую емкость для уменьшения последствий различных повреждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена инновационная технология осуществления реакции синтеза легких элементов на основе взаимодействия встречных пучков ионов.

Приведены расчеты характеристик такого реактора синтеза, показывающие потенциальную возможность реализации с малыми затратами финансовых и материальных средств с получением энергии на выходе реакции многократно превышающей затраты энергии на осуществление реакции.

Приведены сравнения характеристик реакторов на основе реакций, отличающихся сечением взаимодействия исходных нуклидов и требуемой энергии ускорения компонент.

Приведены расчеты характеристик связи реакторов синтеза D-D, D-T и $D-^3\text{He}$, обеспечивающих стационарную работу с использованием в качестве сырьевых материалов дейтерия, лития и ядер трития, получаемых в ходе реакций синтеза.

Показана достаточность опоры на сырьевые дейтерий и литий для развития энергетики синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов П.А. История научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза. Электронный ресурс. <http://docme.ru/download/178483>. Дата обращения 04 12 2018.
2. Орлов В.В., Пономарев Л.И. Ядерные проблемы термоядерной энергетики. // Атомная энергия. Т. 124, вып. 2, февраль 2018.
3. В.А. Глухих, В.А. Беляков, А.Б. Минеев. Физико-технические основы УТС. Курс лекций НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. // НЯЦ РК, Курчатов, 2004.
4. Мачехин Д.А., Ухов А.Л. Линейный ускоритель энергетический. Патент на полезную модель РФ № 49410 от 10 ноября 2005 г. Бюл. № 31.
5. Субботин В.И., Долголева Г.В., Забродин А.В. и др. Энергетическая установка тяжелоионного DT-синтеза с мишенями, содержащими делящиеся материалы. // Атомная энергия. Т. 99, вып. 3, сентябрь 2005.
6. Будкер Г.И. Ускорители со встречными пучками частиц, «УФН», 1966, Т. 89, С. 533.
7. Котов В.М., Витюк Г.А., Жанболатов О.М., Чернова Л.В. Тепловой реактор с торий-урановым и уран-плутониевым топливом и технология его замкнутого цикла. // V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2018), 2–5 октября 2018 г., АО «НИКИЭТ», Москва, Россия.

ИОНДАР ҮДЕТКІШТЕРІН ПАЙДАЛАНУЫ БАР СИНТЕЗ РЕАКТОРЛАРЫ

В.М. Котов, С.В. Котов

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

Ауыр ядроларды бөлу негізіндегі ядролық реакторлар нейтрондардың әрекетінде уранның бөлінуін ашқаннан кейін он жыл өткеннен соң құрылды. Жеңіл ядролар синтезінің негізінде реакторларды құру әрекеттері жетпіс жылдан артық жалғастырылуда. Оларды іске асырудың негізгі бағытын табиғи технологиялар қайталайды – жоғары (жұлдызды) температуралардың әсерімен реакцияларды іске асыру. Бұл бағыт көптеген мәселермен қайшы келді және қазіргі түсінікте толық іске асыру үшін үлкен қаржы салуды талап етеді. Үдеткіш техниканы пайдалану негізінде әзірлемелер бар. Ұсынылған жұмыста D-D, D-T, D-³He реакция иондарының қарсы шоктарды пайдаланумен синтез реакторларын құру мүмкіндігін бағалау жүргізілді. Оларды іске асыру үшін қолданылатын техникалық шешімдер, термоядролық реакторлардың алдында осындай реакторлардың басымдылығы, оларға арналған отынның атқарымдар мүмкіндігі және пайда болатын мәселелер көрсетілген.

SYNTHESIS REACTORS WITH USE OF ION ACCELERATORS

V.M. Kotov, S.V. Kotov

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

Nuclear reactors based on fission of heavy nuclei were created a decade after the discovery of uranium fission by neutrons. Attempts to create reactors based on synthesis of light nuclei have been continuing for more than seven decades. The main direction of their implementation repeats natural technologies - implementation of reactions under the influence of high (stellar) temperatures. This direction has faced a lot of problems, and in the modern sense requires huge investments for its implementation. There are developments based on the use of accelerator technology. In this paper, there is an assessment of feasibility to create synthesis reactors using colliding ion beams of the D-D, D-T, D-³He reactions. The technical solutions applicable for their implementation are shown, advantages of such reactors over thermonuclear reactors, possibility of producing fuel for them and the problems that arise.