

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

УДК 621.039.61

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО
КАТАЛИЗА ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ (D–T–³He)-ПЛАЗМЕ

© 2022 г. А. Н. Шмелев^а, Н. И. Гераскин^а, В. А. Апсэ^а,
В. Б. Глебов^а, Г. Г. Куликов^а, Е. Г. Куликов^а, *

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: egkulikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 29.03.2022 г.

После доработки 04.04.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

В статье оценивается возможность создания условий для взаимовыгодного влияния термоядерных нейтронов трехкомпонентной (D–T–³He)-плазмы и нейтронов деления подкритического blankets. Термоядерные нейтроны, облучающие подкритический blanket, будут поддерживать в нем стационарную цепную реакцию деления, а нейтроны деления, приходящие из blankets в плазму, могут усилить в ней воспроизводство трития через ³He(*n,p*)T-реакцию.

Ключевые слова: гелий-3, воспроизводство трития, гибридная термоядерная установка

DOI: 10.56304/S2079562922030472

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее успешные проекты термоядерных установок (ТЯУ) основаны на использовании двухкомпонентной дейтерий–тритиевой плазмы. Примером может служить известный проект международного токамака ITER [1]. Как известно, природный водород содержит лишь 0.015% дейтерия и совсем не содержит трития из-за слишком короткого периода полураспада (12.3 лет). Одним из способов наработки трития для ТЯУ является нейтронное облучение материалов, содержащих литий, в ядерных реакторах. Нужно количество трития там может накапливаться в ⁶Li(*n*,⁴He)T реакции. Существует ещё один путь к наработке трития, связанный с нейтронным облучением нуклида ³He. В этом случае тритий образуется в ³He(*n,p*)T реакции [2].

В ряде публикаций (например, в [3–6]) рассматривались варианты использования нейтронов, образующихся в термоядерных (D,T) и (D,D) реакциях, для трансмутации радиоактивных отходов либо для накопления делящихся изотопов (ДИ). В этих случаях плазма окружалась blankets, в котором размещались долгоживущие радионуклиды либо воспроизводящие нуклиды (²³⁸U, ²³²Th) для накопления ДИ (²³⁹Pu, ²³³U).

В предыдущие десятилетия исследований взаимовлияние двух цепных реакций синтеза и деления, в которых рождаются нейтроны, практиче-

ски не рассматривалось вследствие двух обстоятельств. Во-первых, в связи с радикально меньшей плотностью ионов в плазме по сравнению с плотностью материалов, используемых в blankets, окружающим плазму (твердые и жидкие материалы) и во-вторых, в связи с существенно меньшим микросечением поглощением нейтронов в плазме по сравнению с blankets. В результате нейтроны поглощались преимущественно в blankets, а если нейтроны и рассеивались blankets обратно в плазму, то проходили сквозь плазму, почти не взаимодействуя с ней.

Для преодоления упомянутой гигантской разницы в поглощении нейтронов в плазме и blankets предлагается ввести в плазму сильный поглотитель нейтронов, а в blankets использовать материалы с рекордно низким поглощением нейтронов. Причем в качестве сильного поглотителя в плазме предлагается использовать ³He, полезный для термоядерных процессов с точки зрения генерации трития и с точки зрения дополнительного нагрева плазмы по реакции синтеза D(³He,*p*)⁴He [7]. Поэтому в настоящей работе предлагается использовать трехкомпонентную плазму, состоящую из дейтерия, трития и ³He, а также blankets, состоящий из нейтронного замедлителя и ДИ. Такая гибридная ТЯУ будет включать центральную зону, в которой идут реакции термоядерного синтеза, окруженную периферийной зоной, для размножения и полезного использова-

ния термоядерных нейтронов. Нейтроны, рожденные в этих зонах, т.е. термоядерные нейтроны в плазме и нейтроны деления в бланкете, будут мигрировать по ТЯУ, выполняя при этом две положительные функции: поддержание стационарной цепной реакции деления (ЦРД) в подкритическом бланкете и воспроизводство трития через ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ реакцию в плазме.

Эти условия открывают возможность усиления совокупной цепной реакции синтеза-деления, что можно рассматривать как нейтронный катализ термоядерных реакций, т.е. как способ усиления термоядерных реакций с помощью такого бланкета.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ ТЯУ

Рассматривалась сферическая модель¹ ТЯУ, состоящая из следующих зон:

1. Плазма (радиус – 125 см).
2. Бланкет (толщина – 50 см), состоящий из нейтронного размножителя/замедлителя и ДИ. В качестве размножителей/замедлителей нейтронов рассматривались такие мало поглощающие нейтроны материалы как металлический бериллий, тяжелая вода и тяжелый замедлитель нейтронов ${}^{208}\text{Pb}$. В них размножение термоядерных нейтронов, утекающих из плазмы в бланкет, осуществляется в пороговых $(n,2n)$ и $(n,3n)$ реакциях. В качестве делящихся нуклидов рассматривались ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$ и ${}^{245}\text{Cm}$.

3. Графитовый отражатель толщиной 50 см.

4. Поглотитель нейтронов утечки (50 см) из карбида природного бора.

По сути, плазма и прилегающий к ней бланкет представляют собой активную зону установки, в которой происходит рождение и размножение нейтронов благодаря реакциям синтеза, деления, $(n,2n)$ и $(n,3n)$.

Рассматривалась плазма, представляющая собой равнокомпонентную смесь дейтерия, трития и ${}^3\text{He}$.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ВОСПРОИЗВОДСТВЕ ТРИТИЯ В ПЛАЗМЕ

Для проведения нейтронно-физических расчетов использовалась компьютерная программа TИМЕ26 [11], рассматривающая одномерную диффузионную модель перенос нейтронов в 26-груп-

¹ Последние десятилетия рассматриваются экспериментальные ТЭУ именно в сферической геометрии, которые называют сферомаками. Например, такая установка создана и функционирует в АО НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (Санкт-Петербург), а также за рубежом [8–10].

повом приближении. Константное обеспечение программы основано на библиотеке оцененных ядерных данных БНАБ-78, которая обрабатывается вспомогательной программой АРАМАКО-С1 для подготовки заблокированных микросечений в каждой зоне установки. При подготовке микросечений учитывались блок-эффект и Доплер-эффект в энергетическом диапазоне разрешенных и неразрешенных резонансов с использованием факторов самоблокировки Бондаренко и концепции микросечений разбавления.

На первом шаге расчетов программа решает однородную условно критическую задачу о переносе нейтронов в ТЯУ, т.е.

$$\hat{L}(r)\varphi(r) = \frac{1}{K_{\text{эфф}}}\hat{Q}(r)\varphi(r); \quad (1)$$

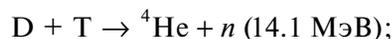
где \hat{L} – оператор, описывающий перенос, поглощение и замедление нейтронов; \hat{Q} – оператор, описывающий генерацию нейтронов деления; $\varphi(r)$ – плотность потока нейтронов по энергетическим группам; $K_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент размножения нейтронов.

На втором шаге расчетов программа решает неоднородную задачу с внешним источником термоядерных нейтронов в зоне плазмы:

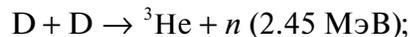
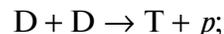
$$\hat{L}(r)\varphi'(r) = \hat{Q}(r)\varphi'(r) + \mathbf{q}_{\text{ТЯУ}}(r); \quad (2)$$

где $\mathbf{q}_{\text{ТЯУ}}(r)$ – интенсивность генерации термоядерных нейтронов в плазме. Расчет интенсивности генерации термоядерных нейтронов исходил из ограничения на нейтронную нагрузку на первую стенку в 1 МВт/м².

Для определения энергетического распределения термоядерных нейтронов использовалась информация о том, что сечение (D,T)-реакции:



примерно в 150 раз превышает сечения двух каналов (D,D)-реакции [12]:



а сечения двух каналов (D,D)-реакции примерно одинаковы в широком диапазоне температур. Это подтверждается характером зависимости микро сечений этих реакций для области температур плазмы от 4 до 70 кэВ. Отметим, что это справедливо только для плазмы с температурами, которые достигнуты в последние 30 лет в экспериментальных установках, например, TFTR (США), JT (Япония), JET (Великобритания).

Можно показать, что при равных концентрациях дейтерия и трития в плазме доля 14.1-МэВ

Таблица 1. Полное воспроизводство трития: бланкет – металлический бериллий

Параметры	^{233}U	^{235}U	^{245}Cm
Вклад плазмы в KB_T	0.61	0.61	0.61
Вклад бланкета в KB_T	0.39	0.39	0.39
$K_{\text{эфф}} (t = 0)$	0.743	0.765	0.703
Доля ДИ, ppm	29.0	31.8	3.8
Вес ДИ ($t = 0$), кг	19.8	21.9	2.8
$\Phi_{\text{плазма}}$, н/см ² сек	$6.3 \cdot 10^{14}$	$6.3 \cdot 10^{14}$	$6.1 \cdot 10^{14}$
$K_{\text{эфф}} (t = 1 \text{ сут})$	0.736	0.758	0.673
Вес ДИ ($t = 1 \text{ сут}$), кг	19.5	21.6	2.6

Таблица 2. Полное воспроизводство трития: бланкет – тяжелая вода

Параметры	^{233}U	^{235}U	^{245}Cm
Вклад плазмы в KB_T	0.57	0.57	0.57
Вклад бланкета в KB_T	0.43	0.43	0.43
$K_{\text{эфф}} (t = 0)$	0.566	0.591	0.511
Доля ДИ, ppm	75.0	81.5	10.0
Вес ДИ ($t = 0$), кг	13.8	15.19	1.9
$\Phi_{\text{плазма}}$, н/см ² сек	$5.2 \cdot 10^{14}$	$5.2 \cdot 10^{14}$	$5.1 \cdot 10^{14}$
$K_{\text{эфф}} (t = 1 \text{ сут})$	0.561	0.586	0.493
Вес ДИ ($t = 1 \text{ сут}$), кг	13.6	14.9	1.8

нейтронов составит 0.997, а доля 2.45-МэВ нейтронов будет равна 0.003.

После неоднородной задачи программа использует полученное распределение плотности потока нейтронов и решает уравнения выгорания для анализа временного поведения $K_{\text{эфф}}$ и концентрации ДИ в бланкете.

Доля ДИ в бланкете подбиралась так, чтобы в первой серии расчетов обеспечить полное воспроизводство трития в плазме, а во второй серии расчетов так, чтобы обеспечить начальное значение $K_{\text{эфф}} = 0.950$.

Под полным воспроизводством трития в плазме подразумевается ситуация, когда коэффициент воспроизводства трития KB_T равен единице, где KB_T это отношение скорости $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ реакции к скорости генерации термоядерных нейтронов. Очевидно, что знаменатель KB_T определяется только свойствами плазмы, а числитель зависит от свойств и плазмы и бланкета. Размерность KB_T это количество ядер трития в расчете на один термоядерный нейтрон. Вклад термоядерных нейтронов в значение KB_T определялся решением неоднородной задачи (2) при нулевом содержании ДИ в бланкете.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Главной целью первой серии расчетов было определение состава бланкета, при котором коэффициент воспроизводства трития $\text{KB}_T = 1$. Рассчитывался эффективный коэффициент размножения нейтронов установки $K_{\text{эфф}}$ без учета термоядерных нейтронов. В силу наличия в установке совместной цепной реакции синтеза-деления (С–Д) необходимо ввести $K_{\text{эфф}}$ и для этой совместной реакции $K_{\text{эфф}}(\text{С–Д})$, которую можно оценить по простой формуле:

$$K_{\text{эфф}}(\text{С–Д}) = \mu(14 \text{ МэВ})\theta\text{KB}_T,$$

где $\mu(14 \text{ МэВ})$ – коэффициент размножения термоядерных нейтронов пороговыми ($n, 2n$) и ($n, 3n$) реакциями в слое бланкета, прилегающем к плазме, а также при делении (при наличии ДИ); θ – вероятность термоядерному нейтрону, размноженному в бланкете, вернуться в плазму и участвовать в $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ реакции.

Кроме того, рассчитывались некоторые нейтронно-физические параметры ТЯУ: плотность потоков нейтронов в плазме, $K_{\text{эфф}}$ и содержания ДИ через сутки. Результаты расчетов представлены в табл. 1–3.

Таблица 3. Полное воспроизводство трития: бланкет – ^{208}Pb

Параметры	^{233}U	^{235}U	^{245}Cm
Вклад плазмы в KB_T	0.27	0.27	0.27
Вклад бланкета в KB_T	0.73	0.73	0.73
$K_{\text{эфф}} (t = 0)$	0.935	0.959	0.872
Доля ДИ, ppm	400	760	41.5
Вес ДИ ($t = 0$), кг	67.0	128.2	7.3
$\Phi_{\text{плазма}}$, н/см ² сек	$7.5 \cdot 10^{15}$	$1.0 \cdot 10^{16}$	$4.3 \cdot 10^{15}$
$K_{\text{эфф}} (t = 1 \text{ сут})$	0.922	0.949	0.830
Вес ДИ ($t = 1 \text{ сут}$), кг	65.1	124.6	6.7

Таблица 4. $K_{\text{эфф}} = 0.950$: бланкет – металлический бериллий

Параметры	^{233}U	^{235}U	^{245}Cm
KB_T	3.01	2.77	3.50
Вклад плазмы в KB_T	0.61	0.61	0.61
Вклад бланкета в KB_T	2.40	2.16	2.89
Доля ДИ, ppm	44.0	48.1	5.9
Вес ДИ ($t = 0$), кг	30.0	33.1	4.2
$\Phi_{\text{плазма}}$, н/см ² сек	$1.3 \cdot 10^{15}$	$1.3 \cdot 10^{15}$	$1.4 \cdot 10^{15}$
$K_{\text{эфф}} (t = 1 \text{ сут})$	0.918	0.921	0.771
Вес ДИ ($t = 1 \text{ сут}$), кг	28.4	31.2	3.1

Результаты, полученные в первой серии расчетов, позволили сделать следующие выводы:

1. Полное воспроизводство трития в плазме может быть достигнуто при достаточно низких значениях $K_{\text{эфф}}$ в случае использования металлического бериллия или тяжелой воды в качестве основного материала бланкета. Нуклид ^{208}Pb позволяет обеспечить полное воспроизводство трития только при более высоких значениях $K_{\text{эфф}}$.

2. Из трех ДИ наилучшие условия для полного воспроизводства трития в плазме обеспечивает ^{245}Cm (минимальные значения $K_{\text{эфф}}$ и веса ДИ) благодаря своим размножающим свойствам, значительно превышающим таковые у ^{233}U и ^{235}U .

3. Темп снижения $K_{\text{эфф}}$ оказался наиболее высоким также при использовании ^{245}Cm в качестве ДИ и по той же причине – более хорошие размножающие свойства ^{245}Cm .

Главной целью второй серии расчетов было определение состава бланкета, при котором начальное значение эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{\text{эфф}}$ в начальный момент времени фиксировано на уровне 0.950. Такая подкритичность способна обеспечить безопасность работы ТЯУ, а также, усилив размножающие

свойства бланкета, открывает возможность для расширенного воспроизводства трития нейтронами деления, приходящими в плазму из бланкета. Увеличение содержания трития в плазме повлечет за собой: интенсификацию (D,T)-реакции синтеза, а следовательно, и дополнительный нагрев плазмы, а также уменьшение ее плотности с последующим практически мгновенным снижением скорости термоядерных реакций и возвращением установки к исходному состоянию. Результаты расчетов представлены в табл. 4–6.

Результаты, полученные во второй серии расчетов, позволили сделать следующие выводы:

1. Улучшенные размножающие свойства бланкета при более высоких значениях $K_{\text{эфф}}$ привели к существенному повышению коэффициента воспроизводства трития в плазме до уровня 5.6–6.7 в тяжеловодном бланкете. Таким образом, открывается возможность для расширенного воспроизводства трития в трехкомпонентной D–T– ^3He плазме, окруженной размножающим нейтроны бланкетом.

2. Наилучшие условия для расширенного воспроизводства трития могут быть созданы в ТЯУ с бланкетом, содержащим ^{245}Cm в качестве ДИ. Несколько худшие условия обеспечивает бланкет с ^{233}U , но и в этом случае коэффициент воспроиз-

Таблица 5. $K_{эфф} = 0.950$: бланкет – тяжелая вода

Параметры	^{233}U	^{235}U	^{245}Cm
КВ _T	5.58	5.06	6.68
Вклад плазмы в КВ _T	0.57	0.57	0.57
Вклад бланкета в КВ _T	5.01	4.49	6.11
Доля ДИ, ppm	167	183	23
Вес ДИ ($t = 0$), кг	30.8	34.0	4.4
$\Phi_{\text{плазма}}$, н/см ² сек	$1.9 \cdot 10^{15}$	$1.8 \cdot 10^{15}$	$2.1 \cdot 10^{15}$
$K_{эфф}$ ($t = 1$ сут)	0.912	0.915	0.741
Вес ДИ ($t = 1$ сут), кг	28.7	31.7	3.1

Таблица 6. $K_{эфф} = 0.950$: бланкет – ^{208}Pb

Параметры	^{233}U	^{235}U	^{245}Cm
КВ _T	1.25	0.85	2.31
Вклад плазмы в КВ _T	0.27	0.27	0.27
Вклад бланкета в КВ _T	0.98	0.58	2.04
Доля ДИ, ppm	420	725	49.2
Вес ДИ ($t = 0$), кг	70.3	122.4	8.6
$\Phi_{\text{плазма}}$, н/см ² сек	$9.6 \cdot 10^{15}$	$8.8 \cdot 10^{15}$	$1.0 \cdot 10^{16}$
$K_{эфф}$ ($t = 1$ сут)	0.934	0.942	0.848
Вес ДИ ($t = 1$ сут), кг	67.8	119.5	7.0

водства трития может достигать величин в диапазоне от 3.0 до 5.6.

Также было изучено влияние нейтронов деления, приходящих в плазму из размножающего бланкета, на энергетическое распределение нейтронов в плазме.

Для более наглядного представления рассчитанный 26-групповой спектр был свернут в более широкие 4 группы. Первая широкая группа объединила энергетические группы библиотеки БНАБ с 1 по 10 (это быстрые нейтроны с $E_n > 21.5$ кэВ), вторая – с 11 по 22 (резонансные нейтроны с энергией от 2.15 эВ до 21.5 кэВ), третья с 23 по 25 (эпитепловые нейтроны с энергией от 0.215 эВ до 2.15 эВ), четвертая – это 26-ая группа библиотеки БНАБ (тепловые нейтроны с $E_n < 0.215$ эВ).

Представляет также интерес изменение спектра нейтронов в плазме под действием бланкета, содержащего и не содержащего ДИ. Укрупненные 4-групповые спектры нейтронов плазмы приведены в табл. 7 и 8.

Результаты, приведенные в табл. 7 и 8, позволили сделать следующие выводы:

1. Из материалов, использованных в качестве замедлителя, бериллий и тяжелая вода наиболее

эффективно смещают спектр нейтронов плазмы в тепловую область. Это окажет влияние на все процессы в плазме и потребует дальнейшего исследования.

2. Из ДИ, содержащихся в бланкете, ^{245}Cm создает наилучшие условия для смещения спектра нейтронов плазмы в тепловую область.

3. Изотоп свинца ^{208}Pb смещает спектр нейтронов в основном в резонансную, а не в тепловую область.

5. О НЕЙТРОННОМ КАТАЛИЗЕ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА В (D,³He)-ПЛАЗМЕ ПРИ УМЕРЕННЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Как известно [7, 12], в (D,³He)-плазме при температуре плазмы 10–25 кэВ сечение (D,³He)– и (D,D)-реакций синтеза на 5–6 порядков меньше, чем (D,T)-синтеза. При использовании нейтронного катализа возникает возможность возбуждения совместной цепной реакции синтеза. При этом такая комбинированная реакция будет, очевидно, иметь две немаловажные особенности. Во-первых, в присутствии тяжелых делящихся нуклидов в бланкете установка оста-

Таблица 7. Спектры нейтронов в вариантах с полным воспроизводством трития

		χ_1	χ_2	χ_3	χ_4
Бериллий	Без ДИ	0.4622	0.3395	0.0387	0.1596
	ДИ- ²³³ U	0.4020	0.3526	0.0428	0.2026
	ДИ- ²³⁵ U	0.4008	0.3558	0.0439	0.1995
	ДИ- ²⁴⁵ Cm	0.4026	0.3434	0.0418	0.2122
Тяжелая вода	Без ДИ	0.5302	0.2692	0.0320	0.1686
	ДИ- ²³³ U	0.4271	0.2747	0.0387	0.2595
	ДИ- ²³⁵ U	0.4260	0.2783	0.0396	0.2561
	ДИ- ²⁴⁵ Cm	0.4301	0.2563	0.0374	0.2672
²⁰⁸ Pb	Без ДИ	0.7368	0.2277	0.0053	0.0302
	ДИ- ²³³ U	0.6680	0.3183	0.0036	0.0101
	ДИ- ²³⁵ U	0.6708	0.3195	0.0063	0.0034
	ДИ- ²⁴⁵ Cm	0.6525	0.3180	0.0076	0.0219

Таблица 8. Спектры нейтронов в вариантах с $K_{эфф}(t=0) = 0.950$

		χ_1	χ_2	χ_3	χ_4
Бериллий	Без ДИ	0.4622	0.3395	0.0387	0.1596
	ДИ- ²³³ U	0.2977	0.3517	0.0482	0.3024
	ДИ- ²³⁵ U	0.3049	0.3606	0.0501	0.2844
	ДИ- ²⁴⁵ Cm	0.2788	0.3269	0.0458	0.3485
Тяжелая вода	Без ДИ	0.5302	0.2692	0.0320	0.1686
	ДИ- ²³³ U	0.2323	0.3186	0.0519	0.3972
	ДИ- ²³⁵ U	0.2398	0.3296	0.0548	0.3758
	ДИ- ²⁴⁵ Cm	0.2125	0.2882	0.0484	0.4509
²⁰⁸ Pb	Без ДИ	0.7368	0.2277	0.0053	0.0302
	ДИ- ²³³ U	0.6654	0.3214	0.0036	0.0096
	ДИ- ²³⁵ U	0.6717	0.3184	0.0063	0.0036
	ДИ- ²⁴⁵ Cm	0.6360	0.3352	0.0080	0.0208

нется подкритической с точки зрения цепной реакции деления. Во-вторых, в (D,³He)-плазме возбуждается реакция (D,T)-синтеза на T, который возникает в плазме вследствие захвата нейтронов ионами ³He. По существу, (D,T)-реакция синтеза в этих условиях оказывается просто звеном в общей цепной реакции. Это позволяет преобразовать расчетную модель (2) из неоднородной задачи в однородную, так как возникший в плазме тритий, будучи рожденным в плазме, сталкивается с дейтерием и с большой вероятностью будет вновь генерировать термоядерный нейтрон с энергией 14.1 МэВ. Преобразованное уравнение модели (2) примет вид:

$$\hat{L}(r)\varphi'(r) = \frac{1}{K_{эфф}(C-D)} [\hat{\Sigma}_{n,p}({}^3\text{He}) + \hat{Q}(r)]\varphi'(r).$$

В этом уравнении присутствует величина $K_{эфф}(C-D)$, которая характеризует эффективный коэффициент размножения нейтронов в совместной цепной реакции синтез-деление в ТЯУ. Авторы предполагают выполнить анализ условий самоподдерживающейся совместной цепной реакции ($K_{эфф}(C-D) = 1$) и развивающейся реакции ($K_{эфф}(C-D) > 1$). При этом предполагается исследовать возможность дальнейшего нагрева плазмы и инициирование (D,D)- и (D,³He)-реакций. При увеличении температуры плазмы

начнет активизироваться также (D,³He)-реакция, оба продукта которой (протон и альфа-частица) с суммарной кинетической энергией 18.3 МэВ будут обеспечивать также интенсивный нагрев плазмы. По мнению авторов это может представлять большой интерес, так как в этих реакциях синтеза будут генерироваться нейтроны, тритий и воспроизводиться ³He в (D,D)-реакции синтеза.

$$K_{эфф}(C-D) = \mu(14 \text{ МэВ})\theta v_T / (1 - K_{эфф});$$

где v_T — число термоядерных нейтронов от (D,T)-реакции с участием трития, произведенного ³He(*n,p*)T реакцией.

Применение нейтронного катализа открывает возможность свести к минимуму содержание радиоактивного трития в (D,³He)-плазме и в топливном цикле такой ТЯУ. При впрыске D- и ³He-нейтралов, они будут участвовать в (D,D)- и (D,³He)-синтезе с нагревом плазмы и одновременно служить подпиткой.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа представляет результаты нейтронно-физических расчетов гибридной ТЯУ с трехкомпонентной D-T-³He плазмой и blanketом, содержащим нейтронный замедлитель (бериллий, тяжелая вода, ²⁰⁸Pb) и делящийся изотоп (²³³U, ²³⁵U, ²⁴⁵Cm). Рассмотрены варианты создания режима полного воспроизводства трития в плазме с $K_{BT} = 1$ и режима расширенного воспроизводства трития с K_{BT} существенно выше единицы при улучшенных размножающих свойствах blanketа. Показана принципиальная возможность организации таких режимов работы гибридной ТЯУ, в которой термоядерные нейтроны плазмы поддерживают стационарную ЦРД в подкритическом blanketе, а нейтроны деления, рожденные и замедленные в blanketе, обеспечивают полное или расширенное воспроизводство трития в плазме.

Реализация расширенного воспроизводства трития в плазме открывает путь к интенсификации термоядерных реакций, к повышению температуры плазмы и, как следствие, к запуску, в добавление к (D,T)-реакции, еще и (D,D) и (D,³He) реакций, не требующих внешней подпитки радиоактивного трития в состав плазмы. В итоге размножающий blanket сыграет роль нейтронного катализатора для запуска всей совокупности самоподдерживающихся термоядерных реакций. После этого делящиеся нуклиды могут быть постепенно удалены из blanketа. При этом должна быть обеспечена непрерывная очистка плазмы от золы (⁴He и легкий водород) и непрерывное впрыскивание нерадиоактивных нейтралов (дейтерия и ³He).

Авторы статьи отдают себе отчет в том, что представленные результаты являются, по сути, предварительными оценками, лишь качественно показывающими на принципиальную возможность синергии реакций деления и термоядерного синтеза в гибридной ТЯУ. Авторы планируют более детально исследовать взаимно полезные нейтронные связи между плазмой и размножающим blanketом с использованием более точной физической модели и более современной базы оцененных ядерных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Жданов С.И., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В.* Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. Учебное пособие. 2007. Москва: МИФИ.
2. *Шмелев А.Н., Куликов Г.Г.* // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2014. № 4. С. 123–129.
3. *Готт Ю.В., Курнаев В.А.* На пути к энергетике будущего. Учебное пособие. 2017. Москва: НИЯУ МИФИ.
4. *Шмелев А.Н., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Ансэ В.А.* О потенциале гибридных (синтез-деление) наработчиков топлива для ядерных реакторов. Учебное пособие. 2014. Москва: НИЯУ МИФИ.
5. *Ансэ В.А., Шмелев А.Н., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г.* Основы безопасного обращения и обезвреживания радиоактивных отходов. Учебное пособие. 2019. Москва: НИЯУ МИФИ.
6. *Barrett R.J., Hardie R.W.* The Fusion-Fission Hybrid as an Alternative to the Fast Breeder Reactor. 1980. Los Alamos National Laboratory, USA.
7. *Чирков А.Ю.* Альтернативные системы термоядерного синтеза. 2012. Москва.
8. *Nagata M.* Non-Inductive Solenoid-Less Plasma Current Start-Up on HIST Using Transient Coaxial Helicity Injection. Proc. 25th IAEA Conf. Thermonuclear Energy. Oct. 13–18, 2014. St. Petersburg, Russia.
9. *Sutherland D., Jarboe T., Morgan K., Marklin G., Brian N.* The Dynamak: an Advanced Fusion Reactor Concept with Imposed-Dynamo Current Drive and Next-Generation Nuclear Power Technologies. Proc. 25th IAEA Conf. Thermonuclear Energy. Oct. 13–18, 2014. St. Petersburg, Russia.
10. *Victor B., Jarboe T., Hansen C., Hossack A., Marklin G., Morgan K., Nelson B., Sutherland D.* Progress on HIT-SI and Imposed Dynamo Current Drive. Proc. 25th IAEA Conf. Thermonuclear Energy. Oct. 13–18, 2014. St. Petersburg, Russia.
11. *Кузьмин А.М., Шмелев А.Н., Ансэ В.А.* Моделирование физических процессов в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах. Учебное пособие. 2015. Москва: Издательский дом МЭИ.
12. *Soppera N., Bossant M., Dupont E.* // Nucl. Data Sheets. 2014. V. 120. P. 294. https://oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.071>

Assessment of Conditions and Possibility for Neutron Catalysis of Thermonuclear Reactions in Three-component (D–T–³He)-Plasma

A. N. Shmelev¹, N. I. Geraskin¹, V. A. Apse¹, V. B. Glebov¹, G. G. Kulikov¹, and E. G. Kulikov¹, *

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: egkulikov@mephi.ru

Received March 29, 2022; revised April 4, 2022; accepted April 11, 2022

Abstract—The paper evaluates a possibility of principle to create conditions for mutually profitable influence of fusion neutrons emitted by three-component (D–T–³He)-plasma and fission neutrons emitted by subcritical blanket. Irradiation of subcritical blanket by fusion neutrons can maintain stationary chain fission reaction while irradiation of plasma by fission neutrons can intensify tritium breeding through ³He(*n,p*)T-reaction.

Keywords: helium-3, tritium breeding, hybrid fusion facility