

УДК 621.039.6

ИСТОЧНИКИ И СКОРОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ УГЛЕРОДА-14 В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

В.И. Хрипунов, Д.К. Курбатов, М.Л. Субботин (ИЯС РНЦ «Курчатовский институт»)

Социально-экономические исследования показывают, что одним из основных факторов, вызывающих увеличение внешних затрат при производстве электроэнергии термоядерным реактором (ТЯР) ближайшего будущего, является долгоживущий ^{14}C , возникающий в материалах и компонентах под облучением нейтронами термоядерного спектра.

В работе представлены результаты последовательного активационного и, отчасти, системного анализа источников и удельных скоростей образования ^{14}C в перспективных малоактивируемых материалах, теплоносителях и размножающих тритий материалах (бридерах) будущих промышленных ТЯР.

Рассмотрены три ведущие концепции энергетических blankets с водяным, газовым и жидкометаллическим охлаждением. Полученные оценки скорости образования ^{14}C сравниваются с величинами, характерными для природных источников ^{14}C и современных реакторов деления.

Показано, что в условиях ТЯР удельная скорость образования ^{14}C на единицу электрической мощности в значительной степени предопределяется начальным содержанием азота в конструкционных материалах, размножителе нейтронов и других компонентах blankets. Ожидается, что при снижении концентрации азота до 0,01 вес. % воздействие ^{14}C , образующегося при производстве электроэнергии, на окружающую среду и, как следствие, на стоимость произведенной электроэнергии будет минимальным.

SOURCE TERMS AND CARBON-14 PRODUCTION RATES IN POWER FUSION REACTORS. V.I. KHRIPUNOV, D.K. KURBATOV, M.L. SUBBOTIN. Socio-economic investigations of fusion power systems showed that a long-lived carbon-14 (^{14}C), appeared under neutron irradiation in materials and components of a commercial thermonuclear reactor (CTR), is probably the major contributor to the external costs of fusion.

A consistent study of source terms, specific and total production of ^{14}C , as the major contributor to the external costs of fusion, was performed by neutron activation analysis of the low activation structural materials, coolants and breeders suggested for power fusion reactors of the nearest future.

Gas-cooled, water-cooled and lithium self-cooled blanket concepts were considered from the ^{14}C production point of view. Evaluated specific ^{14}C activity induced in the blankets at the electric energy generation is given in comparison with the natural and artificial sources of ^{14}C as nuclear tests and power fission reactors.

It is shown that the specific ^{14}C activity appeared in the materials of interest is significantly dependent upon the assumption for nitrogen content. It is recommended to minimize the nitrogen content in the beryllium multiplier and in the low activated structural materials below 0.01 wt %. Then due to the environmental and waste disposal reasons the ^{14}C production by the fusion power reactors will have negligible impact on the cost.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Европе, Японии и других странах осуществляется всесторонний анализ социально-экономических аспектов широкомасштабной термоядерной энергетики [1—3]. Он показывает реальность термоядерного синтеза как нового источника энергии с приемлемыми прямыми и очень низкими внешними затратами.

При этом выясняется, что одним из основных факторов, вызывающих увеличение внешних затрат, является долгоживущий ^{14}C (период полураспада $T_{1/2} = 5730$ лет), возникающий под облучением в водяном теплоносителе, бридере, конструкционных и других материалах энергетических ТЯР [1, 2].

В этой связи в настоящей работе представлены результаты последовательного анализа источников и ожидаемых скоростей образования ^{14}C в перспективных малоактивируемых материалах, теплоносителях и бридерах, предлагаемых для будущих промышленных ТЯР.

Среди различных кандидатных материалов, разработанных в последнее время, карбид кремния, ванадиевые сплавы и ферритные стали, вода, гелий и жидкий литиевый теплоноситель, а также твердые бридеры предлагаются для будущих промышленных ТЯР на том основании, что они соответствуют требованиям безопасного обслуживания, переработки и захоронения отходов через 50—100 лет после окончания эксплуатации. Однако в более поздние периоды времени значительный вклад в эффективную коллективную дозу вносит ^{14}C .

Полученные в данной работе расчетные оценки полной активности ^{14}C , генерируемого в blankets ТЯР из этих мало активируемых материалов на единицу произведенной электроэнергии, сравниваются с величинами, характерными для естественных и искусственных источников ^{14}C .

В этом отношении работа отвечает целям программы МАГАТЭ по определению возможного выхода ^{14}C из различных установок [4].

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ^{14}C В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

«Естественный» ^{14}C образуется непрерывно в верхних слоях атмосферы со скоростью ~ 1400 ТБк/год под воздействием космического излучения, порождающего нейтроны, в результате их последующего взаимодействия с атмосферным азотом согласно реакции $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$. Равновесное содержание ^{14}C в атмосфере в 100 раз больше ($\sim 1,4 \cdot 10^5$ ТБк), тогда как основная часть активности ^{14}C (около $1,0 \cdot 10^7$ ТБк) сосредоточена в глубинах океана [4].

Еще в 1958 г. в работе [5] было показано, что ядерные испытания стали первым искусственным источником ^{14}C . В этой же работе подчеркивалось, что из-за длительного периода полураспада и пребы-

вания в окружающей среде, а также благодаря включению в биологические системы ^{14}C «искусственного происхождения» может оказать значительное воздействие на живую материю.

В настоящее время полное содержание ^{14}C , оказавшегося в атмосфере по окончании ядерных испытаний в 50—60-х годах прошлого века, удвоилось (возросло на $\sim 2,2 \cdot 10^5$ ТБк). При этом считается, что естественный радиационный фон вырос всего на 1%.

В течение нескольких последних десятилетий появились указания (и соответствующие оценки) на вполне определенную возможность образования ^{14}C и в других искусственных источниках — энергетических реакторах деления. ^{14}C образуется в них в результате взаимодействия нейтронов с ^{14}N , ^{17}O и ^{13}C , что может происходить почти во всех элементах и системах реакторов деления, таких, как ядерное топливо, замедлители, теплоносители первого контура и т.п. Появилось понимание того, что скорость образования ^{14}C , которая существенно зависит от типа реактора, должна контролироваться.

По этой причине уже сейчас, в начале формирования термоядерной энергетики генерация и возможная эмиссия ^{14}C в перспективных энергетических реакторах синтеза также должна быть тщательно оценена. Это отчасти и проделано в рамках данной работы.

ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ И ОЖИДАЕМЫЕ СКОРОСТИ РЕАКЦИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ^{14}C

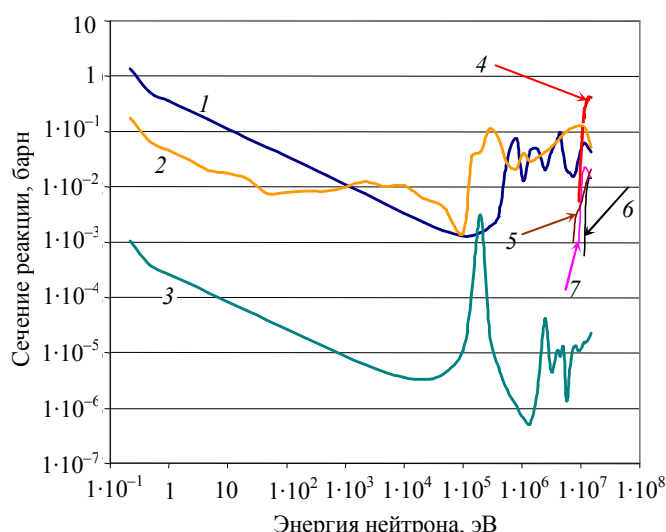


Рис. 1. Сечения реакций, ведущих к образованию ^{14}C и его предшественников (см. EAF-2003 в [6]): 1 — $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$; 2 — $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$; 3 — $^{13}\text{C}(n, g)^{14}\text{C}$; 4 — $^{18}\text{O}(n, 2n)^{17}\text{O}$; 5 — $^{18}\text{O}(n, na)^{14}\text{C}$; 6 — $^{16}\text{O}(n, d)^{15}\text{N}$; 7 — $^{15}\text{N}(n, d)^{14}\text{C}$

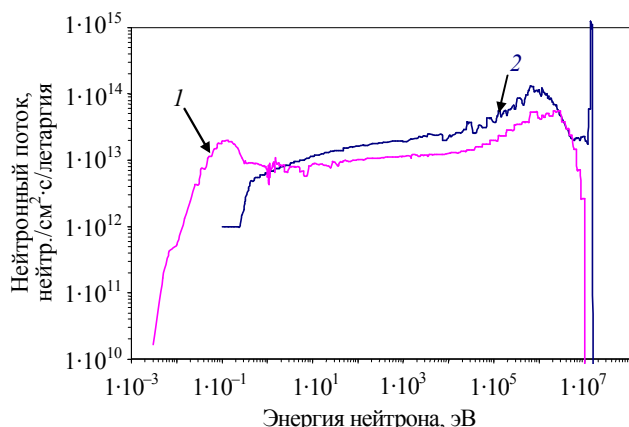


Рис. 2. Нейтронные спектры в реакторах деления (1 — активная зона) и синтеза (2 — бланкет) с водяным охлаждением мощностью 1 ГВт (эл.)

табл. 1 для активной зоны водо-водяного ядерного реактора и водоохлаждаемого бланкета как наиболее вероятного кандидата для первых демонстрационных и промышленных ТЯР.

Основные реакции образования ^{14}C , такие, как $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$, $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ и $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$, обладают довольно значительными сечениями взаимодействия с тепловыми нейтронами — $\sim 1,8$, $0,22$ и $0,0013$ барн соответственно (рис. 1), что способствует относительному увеличению скорости образования ^{14}C в «мягких» участках нейтронного спектра.

С другой стороны, рост этих сечений в области энергий быстрых нейтронов приводит к увеличению скорости образования ^{14}C в термоядерных спектрах по сравнению со спектрами реакторов деления (см. рис. 1).

Эти же особенности энергетической зависимости сечений определяют ожидаемую чувствительность скорости образования ^{14}C к пространственной вариации нейтронного спектра.

В результате анализа спектральных характеристик проектов бланкетов промышленных ТЯР [7—9] установлено, что полный по энергии поток нейтронов и поток быстрых нейтронов в его «активной зоне» — в области первой стенки и бланкете почти в 2 и 2,6 раза превосходят по величине соответствующие значения для современных водо-водяных реакторов эквивалентной электрической мощности (рис. 2).

Эта особенность следует из более низкого удельного энерговыделения на одну реакцию синтеза относительно энергии реакции деления.

Расчетные значения нейтронных потоков, эффективные сечения реакций и удельные скорости образования ^{14}C , приходящиеся на одно исходное ядро элементов, порождающих ^{14}C , сравниваются в

Т а б л и ц а 1. Средние потоки нейтронов ($F_{n\text{-tot}}$), эффективные сечения ($\sigma_{\text{эф}}$) и скорости образования ^{14}C (RR) в реакторах деления и синтеза мощностью 1 ГВт (эл.).

Основные реакции	Символ	ВВЭР	ТЯР	Единица измерения
$^{14}\text{N}(99,6\%)(n, p)^{14}\text{C}$	$F_{n\text{-tot}}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$6,5 \cdot 10^{14}$	$\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
	$\sigma_{\text{эф}}(^{14}\text{N})$	~ 130	~ 60	мбарн
	RR (N_{nat})	$4,3 \cdot 10^{-11}$	$3,9 \cdot 10^{-11}$	1/(ядро $N_{\text{nat}} \cdot \text{с}$)
$^{17}\text{O}(0,038\%)(n, \alpha)^{14}\text{C}$	$\sigma_{\text{эф}}(^{17}\text{O})$	~ 40	~ 40	мбарн
	RR (O_{nat})	$5,0 \cdot 10^{-15}$	$9,6 \cdot 10^{-15}$	1/(ядро $O_{\text{nat}} \cdot \text{с}$)
	$\sigma_{\text{эф}}(^{13}\text{C})$	$\sim 0,18$	$\sim 0,13$	мбарн
$^{13}\text{C}(1,1\%)(n, \gamma)^{14}\text{C}$	RR (C_{nat})	$6,5 \cdot 10^{-16}$	$9,3 \cdot 10^{-16}$	1/(ядро $C_{\text{nat}} \cdot \text{с}$)

* В скобках указана природная концентрация данного изотопа.

Максимальная удельная скорость основной реакции образования долгоживущего изотопа углерода $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ составляет около $4 \cdot 10^{-11}$ атомов ^{14}C в секунду на одно исходное ядро азота. Несмотря на заметные отличия в нейтронных спектрах, она примерно одинакова как для реактора деления, так и для реактора синтеза равной электрической мощности.

Скорость реакции на азоте значительно превышает скорости других реакций нейтронов с ^{17}O и ^{13}C на 3 и 4 порядка величины соответственно. Отметим, что последняя реакция на изотопе ^{13}C даже более интенсивна в жестком спектре ТЯР по сравнению с реактором деления.

Отметим также, что реакция на изотопе кислорода ^{17}O является доминирующей в случае использования водяного охлаждения и керамических бридеров, в состав которых также входит кислород. Строго говоря, изотопы ^{16}O и ^{18}O в результате пороговых реакций, показанных на рис. 1, также вносят свой вклад в значение полной активности ^{14}C , образующегося на кислороде, ~ 12 и $\sim 17\%$ соответственно.

Другими реакциями, например, тройным делением урана, также порождающим ^{14}C в ядерном топливе, в условиях ТЯР можно пренебречь.

Таким образом, по результатам активационного анализа примесь азота представляется наиболее важным источником образования ^{14}C в материалах ТЯР.

СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ^{14}C В МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ

Сравнительный анализ активационных характеристик материалов выполнен для условий, характерных для первой стенки ТЯР, где интенсивность нейтронных потоков максимальна.

При этом учитывались детальные химические композиции малоактивируемых материалов, предлагаемых их разработчиками. Однако особенно тщательно фиксировалось содержание в них азота, кислорода и углерода как составляющих элементов или примесей в связи с отмеченной их ролью в образовании ^{14}C .

Активационный анализ был выполнен с помощью европейской системы EASY [6], включающей в себя Европейский активационный файл EAF-2003 и программу расчета накопления изотопов.

Он еще раз показал (табл. 2), что именно наличие азота в графитовом композите, ванадиевых сплавах и бериллии фактически предопределяет наведенную в этих материалах остаточную активность ^{14}C . При этом одной части азота на миллион весовых частей исходного материала соответствует образование $\sim (0,4 - 1,1) \cdot 10^5$ Бк ^{14}C на 1 кг материала после его облучения до эквивалентного флюенса нейтронов в 1 МВт·год/м².

Т а б л и ц а 2. Расчетная скорость образования ^{14}C (МБк/кг) в малоактивируемых материалах ТЯР (1 МВт·год/м²)

Материал	Плотность, г/см ³	О, вес. %	С, вес. %	N, вес. %	МБк/кг
С (чистый)	2,1		100		3,2
CFC Dunlop	2,1		~ 100	0,001	4,3
Be	1,85	~ 1	$\sim 0,1$	0,028	32
H ₂ O	0,82	89		0,0001	34
Li промышленный	0,53	0,005	0,03	0,03	~ 30
Li очищенный	0,53	0,001	0,001	0,001	1,9
Li ₂ TiO ₃	2,9	~ 47			18
Li ₂ ZrO ₃	4,1	~ 31			~ 12
F82H	7,9	0,005	$\sim 0,1$	0,002	2,1
V—5Cr—5Ti	6,0	0,04	0,015	0,015	17
Zircalloy 2	6,5	0,1		0,05	~ 60
SiC _f (CG)	2,3	5,8	28,2	0,11	130

Таким образом, для реальных материалов, представляющих интерес при разработке ТЯР, удельная активность ^{14}C после облучения в районе первой стенки до величины единичного нейтронного флюенса ($1 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$) ожидается в пределах от ~ 4 до 130 МБк на 1 кг материала.

Для сравнения отметим, что такой уровень активности значительно превышает равновесную активность природного углерода ($\sim 250 \text{ Бк/кг}$) и может рассматриваться как загрязнение.

СООТНОШЕНИЕ НЕЙТРОННОЙ НАГРУЗКИ НА ПЕРВОЙ СТЕНКЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ БЛАНКЕТА

Скорость образования ^{14}C в ТЯР различных типов зависит от полного количества конструкционных материалов, подверженных облучению нейтронами термоядерного спектра, наличия размножителя нейтронов, вида бридера и теплоносителя и, в особенности, от концентрации азота в этих компонентах. Поэтому в каждом случае для аккуратного расчетного предсказания скорости генерации ^{14}C требуется детальное представление о геометрической структуре, композиции и распределении материалов, а также об изменении пространственно-энергетического распределения нейтронов по элементам конструкции энергетического blankets.

Тем не менее в модельных исследованиях, направленных на изучение экономических и экологических аспектов термоядерной энергетики, возможен упрощенный подход к оценке генерации ^{14}C . В частности, имея в виду линейную зависимость нейтронно-физических характеристик энергетического blankets от нейтронной нагрузки на первую стенку, возможен переход от параметров ТЯР, традиционно нормированных на нейтронную нагрузку, к производимой этими реакторами электроэнергии.

Так, по результатам системного анализа нейтронно-физических и энергетических характеристик демонстрационных и коммерческих ТЯР, представленных в [7—9], в рамках данной работы был получен коэффициент $\sim 2,2 \text{ МВт(ДТ-н)}/\text{м}^2/\text{МВт (эл.)}$, соотносящий среднюю удельную нейтронную нагрузку на первую стенку с электрической мощностью, снимаемой с находящегося за ней blankets. Этот фактор представляет собой комбинацию коэффициента умножения энергии нейтронов $\sim 1,4—1,5$, характерного для blankets разных типов, и типичного коэффициента преобразования тепловой энергии в электричество $\sim 0,31—0,41$. Кроме того, в нем учтены потери тепловой энергии в неэнергетических областях реактора, таких, например, как дивертор и системы дополнительного нагрева плазмы ($\sim 10—15\%$).

Указанный фактор довольно консервативен. Для blankets различных типов погрешность оценок активационных характеристик, вносимая этим коэффициентом, не превышает 10% . Применение этого обобщенного коэффициента в активационном анализе позволяет сопоставить удельную наработку ^{14}C в энергетических blankets различных типов, базируясь лишь на их «радиальную» структуру.

УГЛЕРОД-14 В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БЛАНКЕТОВ

С целью определения элементов конструкции, ответственных за максимальную наработку ^{14}C , были рассмотрены три ведущие концепции энергетических blankets, предложенных в [7—9] и отличающихся используемыми материалами и теплоносителями, а именно:

- засыпной водоохлаждаемый blanket из ферритной стали с перегревом пара, выбранный в [8] в качестве наиболее вероятного прототипа коммерческого ТЯР первого поколения;

- blanket с твердым бридером, ванадиевым конструкционным материалом и газовым (гелиевым) теплоносителем [7];

- самоохлаждаемый blanket (с жидкометаллическим литиевым охлаждением и ферритной сталью), как предлагается в [7, 9].

Все указанные конструкции blankets толщиной соответственно ~ 56 , 45 и 50 см в качестве размножителя нейтронов включают бериллий.

Для приведения результатов к единице произведенной электроэнергии масштаба 1 ГВт (эл.) в год использовался указанный «полубезразмерный» нормировочный коэффициент. Кроме того, учитывалось пространственно-энергетическое распределение нейтронов по толщине, отличающееся для blankets разных типов, а также и другие особенности.

В табл. 3 приведены объемные доли материалов blankets и полученные расчетные значения удельной наработки ^{14}C в бридере, конструкционных материалах, размножителе нейтронов и теплоносителе. Результаты нормированы на единицу произведенной электроэнергии.

Т а б л и ц а 3. Композиция и распределение удельной активности ^{14}C по элементам blankets различных типов (на 1 ГВт (эл.)·год)

Водоохлаждаемый blanket [8]					
F82H	Li_2ZrO_3	Be	H_2O	Zr	Всего
14	10	42	13	1	80 объем. %
1,1	0,8	2,7	0,9	1,1	6,6 ТБк (180 Ки)
Газоохлаждаемый blanket [7]					
V—5Ti—5Cr	Li_2TiO_3	Be			
11%	11%	53%			75 объем. %
6,0	2,3	7,7*			16 ТБк (430 Ки)
Самоохлаждаемый Li-blanket [7]					
V—5Ti—5Cr	Liq. Li	Be			
16%	71%	13%			100 объем. %
2,1	0,3	0,8			3,2 ТБк (90 Ки)

* В эту величину для данного варианта конструкции включены ~1,2 ТБк в бериллиевом покрытии первой стенки толщиной 1 см.

Проинтегрированная по компонентам энергетических blankets удельная наработка ^{14}C при производстве 1 ГВт (эл.)·год в ТЯР составляет от ~3 до 16 ТБк/год (см. табл. 3). Вклад в полную активность ^{14}C других элементов конструкции, таких, как радиационная защита, по оценкам составляет ~5% от указанных значений и в рамках данной работы во внимание не принимается.

Анализ распределения активности ^{14}C по элементам конструкции показывает, что большая ее часть образуется в первой стенке, конструкционных элементах и бериллиевом размножителе нейтронов. Как отмечалось, в определяющей степени уровень этой активности обусловлен наличием азота в исходных материалах: от 20 вес. частей/млн в ферритной стали до 280 вес. частей/млн в бериллии и даже около 1100 вес. частей/млн в карбиде кремния (см. табл. 2). В последнем случае ^{14}C может составить определенную проблему для таких продвинутых проектов, использующих SiC/SiC-композиты, как американский ARIES или японский DREAM.

Более высокие значения, полученные для засыпного варианта blankets с газовым охлаждением [7], отражают ~30%-ное увеличение скорости образования ^{14}C в относительно более «мягком» спектре нейтронов, ожидаемом в «гомогенной» смеси бридера и бериллиевого размножителя, чем в слоистом («гетерогенном») blanketе типа CREST [8] с водяным охлаждением. Заметный вклад вносит также 1-см бериллиевое покрытие первой стенки газоохлаждаемого blankets (см. табл. 3).

Анализ энергетических параметров водоохлаждаемых реакторов синтеза и деления, таких, как ИТЭР, CREST и ВВЭР-1500, показывает, что во всех случаях удельный расход воды составляет примерно 5 кг/с на 1 МВт тепловой мощности. Поэтому величина ~1 ТБк/(ГВт (эл.)·год), указанная здесь для водяного теплоносителя в энергетическом blanketе типа CREST [8], может ожидаться и для других вариантов конструкции ТЯР первого поколения с водяным охлаждением.

Концентрация азота в водяном теплоносителе очень мала (обычно ~1—5 вес. частей/млн). Поэтому азотом как источником ^{14}C в водяном теплоносителе относительно его наработки на ^{17}O можно пренебречь.

При разработке конструкции самоохлаждаемого Li-blanket предполагается, что концентрация азота в литиевом контуре будет поддерживаться на уровне 50 вес. частей/млн. Это необходимо для предотвращения образования нитридов, затрудняющих выделение трития из контура.

Таким образом, вклад реакции на кислороде в реакторной воде (~0,9 ТБк) и свободного от кислорода жидкометаллического Li-теплоносителя (~0,3 ТБк) составляет всего около 13% от полной наработки ^{14}C . Примерно такой же вклад ожидается и от твердых кислородсодержащих керамических бридеров в результате реакции нейтронов с ^{17}O . Возможное наличие примеси азота в этих материалах в данном анализе не учитывалось.

ТЯР И ДРУГИЕ ИСТОЧНИКИ ^{14}C

Полученные в данной работе расчетные скорости образования ^{14}C в бланкетах ТЯР с водяным, газовым и жидкометаллическим охлаждением на единицу произведенной электроэнергии сравниваются в табл. 4 с имеющимися оценками для современных ядерных реакторов [4].

Т а б л и ц а 4. Удельные скорости образования ^{14}C в ядерных и термоядерных реакторах различных типов (ТБк/(ГВт·(эл.)·год))

Ядерные реакторы		Энергетические бланкеты ТЯР	
Легководные	1—4	Водоохлаждаемые	7
Газоохлаждаемые	6—18	Газоохлаждаемые	16
Тяжеловодные	10—12		
Быстрые	0,5—1	Li, самоохлаждаемые	3

Сравнение показывает, что оценки, полученные для ТЯР, соответствуют диапазону значений, характерному для современных энергетических ядерных реакторов (легководных, быстрых бридеров с жидкометаллическим натриевым охлаждением, высокотемпературных графитовых реакторов с газовым охлаждением, а также тяжеловодных реакторов).

В отличие от реакторов синтеза максимальная скорость образования ^{14}C на ^{17}O характерна для ядерных реакторов на тяжелой воде из-за использования в них больших объемов D_2O -замедлителя нейтронов.

В высокотемпературных ядерных реакторах с газовым охлаждением образование ^{14}C так же, как и в рассматриваемых здесь бланкетах ТЯР, предопределяется в основном начальным содержанием азота в больших объемах графита.

Несмотря на близкие значения удельной наработки ^{14}C , общее количество материалов, выгружаемых из реакторов синтеза и содержащих ^{14}C , будет в несколько раз выше, поскольку объемы бланкетов примерно в 10 раз превышают соответствующие объемы активных зон (легководных) ядерных реакторов.

Следует отметить, что для производства 1 ГВт (эл.)·год электроэнергии необходимо затратить ~140 кг трития. При этом в камере ТЯР будет выделено $(4,5—5)10^{28}$ ДТ-нейтронов. Такой выход ДТ-нейтронов в 6,5—7 раз выше, чем полный выход нейтронов в активной зоне реактора деления эквивалентной мощности.

В то же время полученные оценки удельной наработки ^{14}C почти на 5 порядков величины меньше полной активности ^{14}C , выброшенной в биосферу при ядерных испытаниях прошлого столетия. В этом смысле термоядерные нейтроны, обеспечивающие производство электроэнергии на промышленных ТЯР, представляются значительно более безопасными.

Однако при рассмотрении экстенсивных моделей термоядерной энергетики, предусматривающей, например, использование 1000 реакторов мощностью по 1 ГВт (эл.) в течение 1000 лет, эта разница в пять порядков может быть исчерпана.

В этом случае необходимо будет позаботиться о снижении скорости образования и выхода ^{14}C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен последовательный анализ источников и скоростей образования ^{14}C в малоактивируемых материалах и бланкетах реакторов синтеза с водяным, газовым и жидкометаллическим охлаждением, предлагаемых для построения термоядерной энергетики ближайшего будущего.

Анализ показывает, что ожидаемые удельные скорости образования ^{14}C на единицу произведенной электроэнергии находятся в диапазоне, характерном для современных реакторов деления. Однако они и не являются существенно меньшими, чего можно было бы ожидать в условиях более жестких спектров термоядерных нейтронов.

В ТЯР мощностью 1 ГВт (эл.) полная наработка ^{14}C за год непрерывной работы составит 3—16 ТБк (или 90—430 Ки) в зависимости от концентрации примеси азота в материалах и особенностей конструкции и спектра нейтронов в бланкетах различных типов.

Водяное охлаждение вносит в полную наработку ^{14}C менее 1 ТБк/(ГВт (эл.)·год), а кислород в составе керамических бридеров — около 1—2 ТБк/(ГВт (эл.)·год).

Анализ показал, что во время работы реактора потенциально возможен частичный выход активности ^{14}C вместе с распыленными элементами первой стенки ТЯР, газом-носителем трития и операционными отходами водяного и жидкометаллического теплоносителя.

Другим потенциальным источником ^{14}C может оказаться жидкий азот при его использовании в качестве первичного теплоносителя для сверхпроводящих систем и тепловой защиты крионасосов. В этом случае для ограничения скорости образования ^{14}C путем снижения уровня нейтронных потоков должна быть предусмотрена нейтронная защита таких контуров и систем.

Основная часть образовавшегося ^{14}C будет сосредоточена в твердых материалах и может выйти в окружающую среду лишь при демонтаже элементов ТЯР, переработке отдельных компонентов, например, из бериллия, и после захоронения.

Для определения путей возможного попадания ^{14}C в окружающую среду и выработки надлежащих требований к выбору материалов и конструкции необходим более тщательный анализ, выходящий за пределы данной работы.

В настоящее время представляется желательным включить азот в список элементов, контролируемых при разработке малоактивируемых материалов, наряду с такими примесями, как Nb, Mo, Ag, Co, Ni. При этом весьма желательно уменьшить содержание азота до $< 0,01$ вес.% (или < 100 вес. частей/млн).

В этом случае ожидаемая генерация ^{14}C и его воздействие на окружающую среду будут снижены в несколько раз, а его вклад в стоимость электроэнергии, полученной с помощью ТЯР, будет незначительным.

Авторы статьи выражают признательность Управлению по атомной энергии Великобритании (UKAEA) и лично д-ру Р.А. Форресту за предоставленную возможность использования в активационных расчетах мощной европейской системы EASY-2003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин М.Л. Анализ проблем экологии и безопасности термоядерной энергетической станции. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1992, вып. 2, с. 3—11.
2. The EFDA Leader. Socio-Economic Aspekt of Fusion Power. — Executive Summary, 18 April 2001.
3. Konishi S., Okano K., Tokimatsu K., Ito K., Ogawa Y. Socio-economic study of fusion energy at the Japan Atomic Energy Research Institute. — Fusion Engineering and Design, 2003, vol. 69, Issues 1—4, p. 523—529.
4. International Atomic Energy Agency. Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14. IAEA-TECDOC-421, Vienna, 2004.
5. Сахаров А.Д. Радиоактивный углерод ядерных взрывов и пороговые биологические эффекты. — Атомная энергия, 1958, т. 4, вып. 6, с. 576—580.
6. Forrest R.A. The European Activation System: EASY-2003, Overview, Issue 1. EASY Documentation Series, UKAEA Fus 484, EURATOM/UKAEA Fusion Association, December 2002.
7. Shatalov G.E. et al. Russian DEMO-S reactor with continuous plasma burn. — Fusion Engineering and Design, 2000, vol. 51—52, p. 289—298.
8. Okano K. et al. Compact reversed shear tokamak reactor with a superheated steam cycle. — Nuclear Fusion, 2000, vol. 40, № 3, p. 635—640.
9. Steiner D., El-Guebaly L. et al. ARIES-RS safety design and analysis. — Fusion Engineering and Design, 1997, vol. 38, p. 189—218.



Владимир Иванович Хрипунов, ведущий н.с., кандидат т.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности
 Дмитрий Константинович Курбатов, старший н.с., кандидат ф.т.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности
 Михаил Леонидович Субботин, начальник лаборатории, исполнительный директор, ветеран атомной энергетики и промышленности

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2006 г.
 Вопросы атомной науки и техники.
 Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 2, с. 10—17.