

УДК 533.9

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И СКОРОСТЕЙ НАРАБОТКИ ^3H , ^4He В ЛИТИЕВОЙ КПС ПРИ ЕЕ ОБЛУЧЕНИИ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М¹⁾ Прозорова И.В., ¹⁾ Скаков М.К., ¹⁾ Тажибаева И.Л., ¹⁾ Понкратов Ю.В., ^{1,2)} Кульсартов Т.В.¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан²⁾ НИИЭТФ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

В статье приведены результаты расчетов выбора основных параметров ампульного устройства для облучения образцов литиевой КПС; по оценке энерговыделения и скоростей наработки трития и гелия в литиевой КПС при ее облучении на реакторе ИВГ.1М. Актуальность работы обусловлена перспективами использования лития в будущих ТЯР в качестве плазмообращенного материала. Данная работа будет способствовать продвижению литиевых технологий с использованием КПС в современных токамаках и направлена на развитие основ проектирования демонстрационных и коммерческих источников термоядерной энергии будущего.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (Грант № К-2204). Проект «Реакторные испытания литиевых КПС».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из напряжённых узлов в термоядерных реакторах является дивертор, без которого пока не просматривается конструкция ни реактора следующего поколения ДЕМО, ни будущих промышленных реакторов. Энергетические нагрузки на пластины дивертора на порядок и более (в случае срывов плазменного шнура) могут превышать нагрузки на первую стенку разрядной камеры.

Как известно, кулоновский барьер дейтерий-тритиевой термоядерной реакции составляет около 100 кэВ. Из этого следует, что для работы токамака необходимо термически изолировать разрядную стенку от горячей плазмы, имеющей температуру миллионы градусов. Основная задача дивертора термоядерной установки — термонизация стенки камеры токамака и предотвращение диффузии примесей в центр плазменного шнура [1, 2]. Для этих целей было предложено использование литиевых капиллярно-пористых систем (КПС) — принципиально нового материала, в котором жидкий литий заключён в матрицу из пористого материала и удерживается силами поверхностного натяжения [3]. На рисунке 1 представлен внешний вид капиллярной пористой системы на основе сеток. На рисунке 2 представлен внешний вид капиллярной пористой системы, смоченной литием [4, 5].

Использование капиллярной пористой структуры (КПС), изготовленной из различных металлов и сплавов, заполненной жидким литием, обеспечит самовосстанавливающуюся поверхность с саморегуляцией расхода лития, поскольку распределение давления лития в КПС сразу реагирует на локальные изменения тепловой нагрузки на поверхность КПС [6].

Все это позволяет снизить нагрузки на материалы лимитера и дивертора токамаков и является в настоящее время наиболее эффективным путем решения материаловедческих и инженерных проблем создания термоядерного реактора.

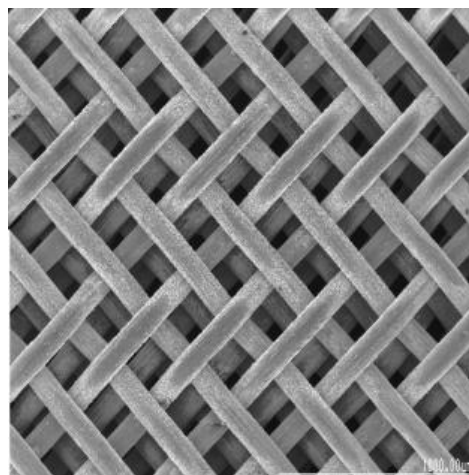


Рисунок 1. Внешний вид капиллярной пористой системы на основе сеток [4, 5]

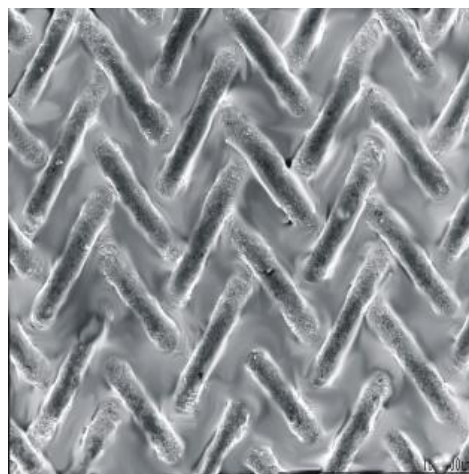


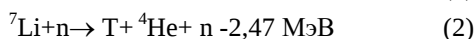
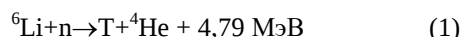
Рисунок 2. Внешний вид капиллярной пористой системы смоченной литием [4, 5]

Целью экспериментов, для которых проводились расчеты, является испытание образцов литиевой КПС при облучении на реакторе ИВГ.1М в присут-

ствии изотопов водорода [7]. Задача расчетного исследования состояла в определении скоростей реакций наработки трития в литневой КПС, а также выборе основных параметров ампульного устройства (АУ), в частности, материального состава, размера устройства, объема исследуемых образцов. В ходе расчетов были проведены оценки энергосвечения литневой КПС при термализации ионов для итогового варианта размещения АУ в канале реактора.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Основные реакции на изотопах лития с участием нейтронов, в результате которых образуется тритий следующие:



Общий вид ампульного устройства с основными размерами представлен на рисунке 3.

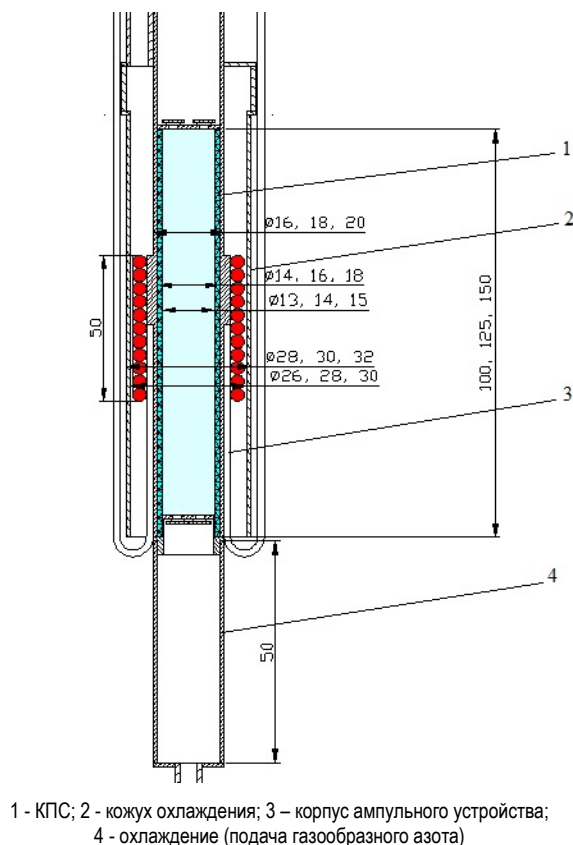


Рисунок 3. Общий вид АУ

Были разработаны схемы проведения нейтронно-физических расчетов для данной конструкции АУ, которые включали оценку скоростей реакции $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ для различных возможных цилиндрических геометрий АУ с образцом лития (7,42 % ^6Li) в условиях реакторного облучения. Были определены следующие исходные данные и условия:

1) АУ располагается в центре активной зоны реактора и должно соответствовать размерам ФКЭ (физический канал экспериментальный).

2) Образец КПС с литием должен находиться в герметичном контейнере.

3) Контейнер должен быть снабжен термодатчиками.

4) Система охлаждения контейнера должна обеспечивать возможность поддержания температуры образца КПС не выше 600 °С.

5) Толщина слоя лития в КПС должна обеспечивать максимально возможную для данной конструкции утилизацию тепловых нейтронов.

6) Реактивность, вносимая ампулой с литневой КПС, должна быть такой, чтобы обеспечить работу реактора на мощности 6 МВт не менее 4 часов.

Ниже представлены варьируемые параметры расчета.

Толщина слоя лития в КПС: 0,5; 1; 1,5 мм.

Высота литиевого слоя: 100, 125, 150 мм.

Состав материалов АУ: алюминий, сталь.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты были выполнены с помощью метода Монте-Карло и программы MCNP [8, 9] для ~50 миллионов историй, стандартное отклонение σ для $k_{\text{эф}}$ находится в диапазоне ~0,0015–0,0017, расчетные ошибки для скоростей реакций от 0,15 % до 0,3 %. На первом этапе расчетов была сделана оценка влияния количества ^6Li на реактивность реактора. Литий-6 обладает большим сечением поглощения - микросечение $\sigma(n, \alpha)$ реакции для изотопа ^6Li составляет 945 барн, средняя длина пробега нейтронов λ равна ~23 мм. На рисунке 4 представлена зависимость изменения запаса реактивности реактора от массы ^6Li (100 %) в ФКЭ.

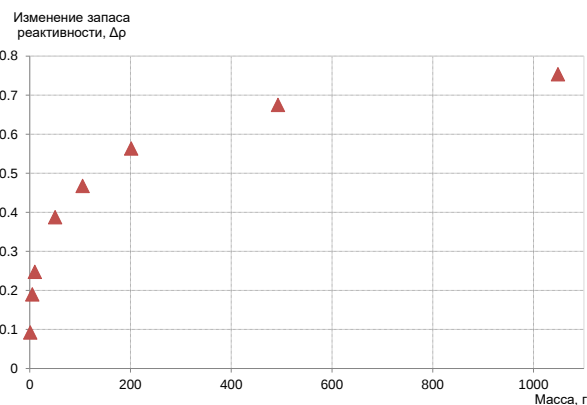


Рисунок 4 Зависимость изменения запаса реактивности реактора от массы ^6Li (100 %) в ФКЭ

Анализируя данный график, следует отметить, что производная или тангенс угла наклона касательной к кривой непостоянны, на начальном участке тангенс больше по абсолютной величине. Видно, что изменение запаса реактивности не является постоянным, зависимость реактивности от массы образца нелинейная. Отдельно следует сказать о существующей зависимости реактивности от геометрии образца, которая не исследовалась в этой задаче.

На втором этапе были рассчитаны скорости наработки трития в образце литневой КПС. Геометрия разбиения образца на расчетные ячейки была выбрана следующим образом: образец, который геометрически представлял из себя цилиндр различной толщины («труба»), разбивался только по высоте на сегменты с шагом 5 мм. В итоге значения скорости реакции получены для каждого сегмента, который представлял из себя цилиндр высотой 5 мм и с различной толщиной (0,5; 1; 1,5 мм). Были получены распределения значений скорости реакции по всей высоте образца.

На рисунке 5 представлены рассчитанные абсолютные скорости реакции наработки трития в объеме расчетной ячейки для образцов литневой КПС различной толщины, нормированные на один нейтрон деления в АЗ реактора (для мощности 1 МВт количество нейтронов деления составляет $\sim 7,835 \cdot 10^{16}$).

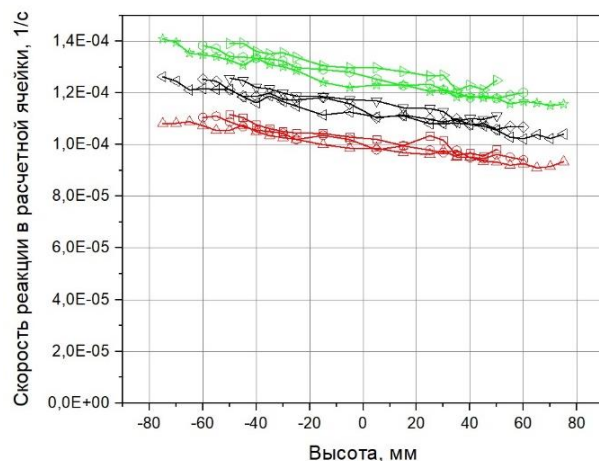
Как видно из рисунков, существует неравномерность в распределении скорости наработки трития по высоте образца, которая в целом отражает существующую неравномерность в нейтронном потоке по высоте АЗ реактора.

Далее для оценки оптимальных размеров образца были проанализированы полученные расчетные зависимости. Прежде всего, по полученным данным были рассчитаны и оценены зависимости абсолютной скорости наработки трития во всем образце от геометрических размеров ячейки: здесь оказалось, что существует практически линейная зависимость абсолютной скорости реакции наработки трития от высоты образца и от площади трубчатого сегмента образца (см. рисунок 6, где приведены данные сравнения для образцов толщиной 0,5 мм), из чего следует что скорость наработки трития в образце пропорционально объему образца.

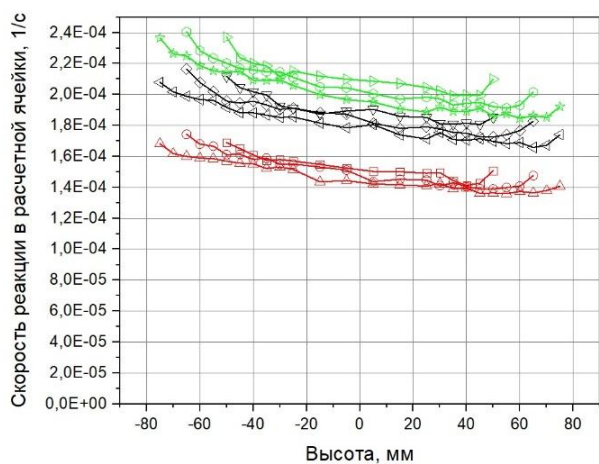
Затем были рассчитаны средние удельные скорости наработки трития в образце и абсолютные скорости наработки трития во всем образце (для всех геометрий).

Как и ожидалось, скорость наработки трития в образце была прямо пропорционально объему образца (для толщин 0,5 мм и 1,5 мм), а также имела несколько неравномерную зависимость для образца толщиной 1 мм. На рисунке 7 приведены скорости реакций наработки трития во всем образце для различных геометрий.

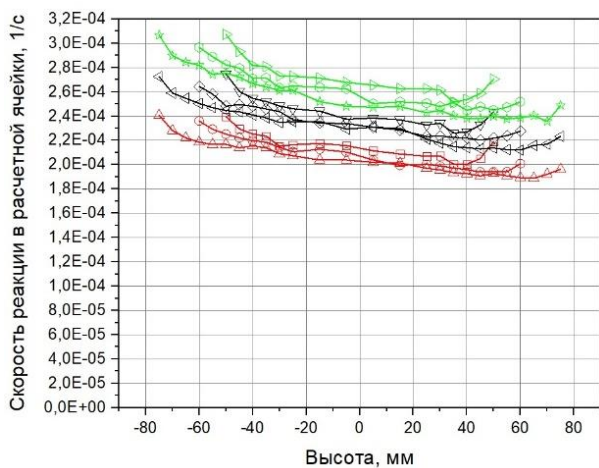
Удельная усредненная скорость наработки трития в образце существенно зависела от толщины образца (чем тоньше образец, тем она была выше). На рисунке 8 представлены средние удельные скорости реакций наработки трития для различных геометрий образца.



а)



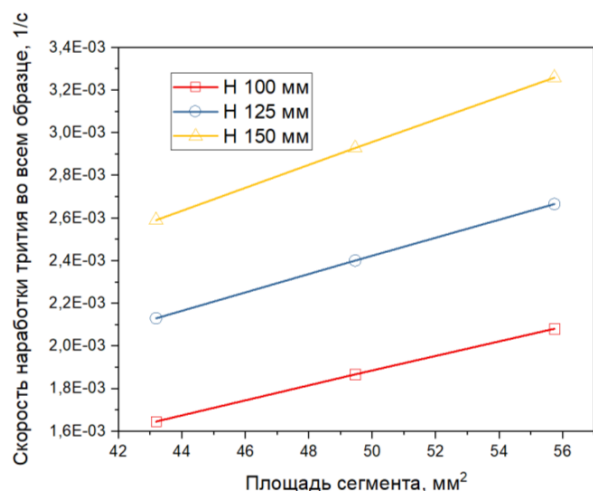
б)



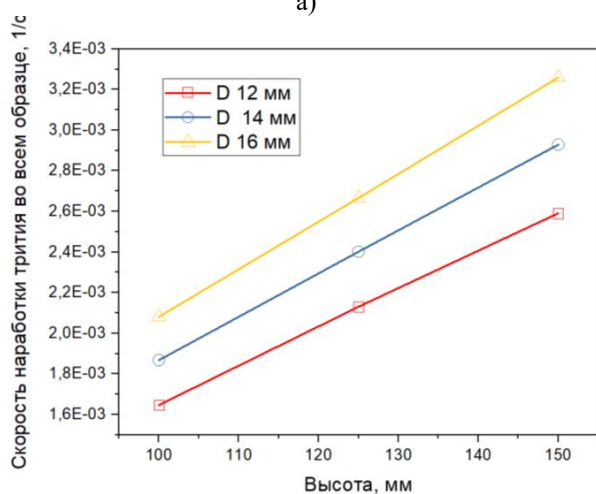
в)

— D 18 мм, H 100 мм — D 16 мм, H 100 мм — D 14 мм, H 100 мм
— D 18 мм, H 125 мм — D 16 мм, H 125 мм — D 14 мм, H 125 мм
— D 18 мм, H 150 мм — D 16 мм, H 150 мм — D 14 мм, H 150 мм

Рисунок 5. Распределение абсолютной скорости реакции наработки трития в расчетной ячейке по высоте образца литневой КПС. Толщина слоя: 0,5 (а), 1 (б), 1,5 мм (в)



а)



б)

Рисунок 6. Зависимости абсолютной скорости реакций наработки трития от геометрических параметров образца литиевой КПС (площади (а) и высоты (б) сегмента) для образцов с толщиной слоя 0,5 мм

Также были выполнены оценки энерговыделения в образце литиевой КПС.

В расчетах было принято, что образец КПС представлял собой сетку из стали X18H10T со слоем природного лития. Сечение ^6Li определяется скоростью нейтрона v по закону $\sigma \sim 1/v$, и достигает 945 барн для тепловых нейтронов. Поскольку лития-6 в природном составе 7,42 %, то для природного лития эффективное сечение составит ~ 70 барн. Энергия реакции составляет 4,78 МэВ и делится на ядро отдачи трития 2,73 МэВ, а на ядро ^4He приходится 2,05 МэВ.

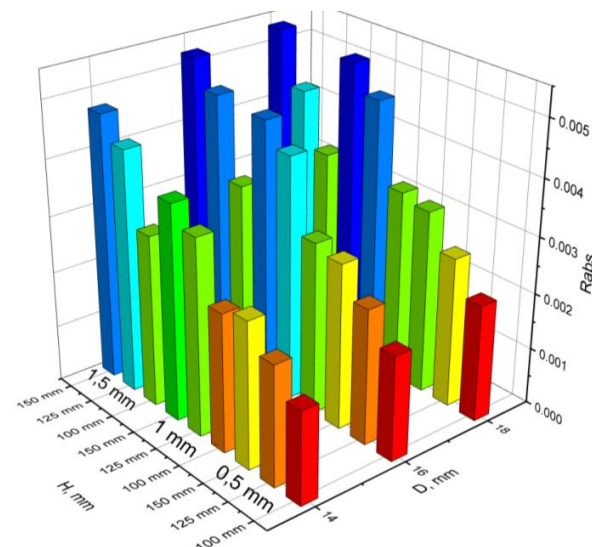


Рисунок 7. Скорости реакций наработки трития во всем образце для различных геометрий

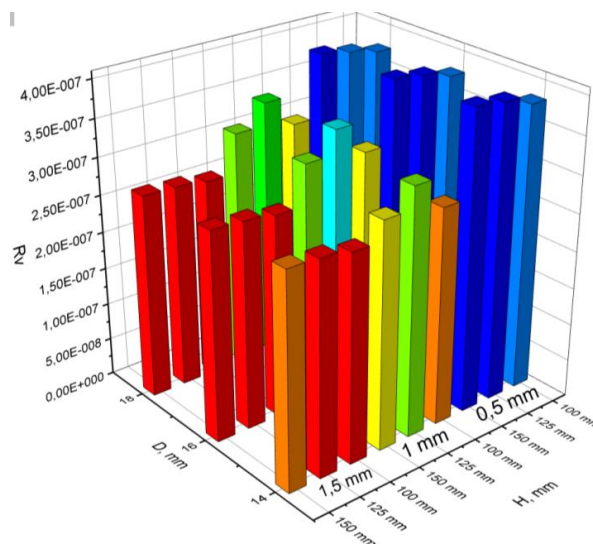


Рисунок 8. Средние удельные скорости реакций наработки трития для различных геометрий образца

В целом энергетический выход реакции синтеза пропорционален плотности потока тепловых нейтронов, облучающих КПС, массе мишени и зависит от формы облучаемого тела – площади поверхности и толщины пластины из литиевой КПС.

В таблице представлено энерговыделение из литиевой КПС для мощности реактора, равной 6 МВт.

Таблица. Энерговыделение для литиевой КПС

Плотность, г/см ³	Объем, см ³	Масса, г	Среднее энерговыделение в литии, Вт/г на 1 МВт реактора		Общее энерговыделение в литии для мощности реактора 6 МВт, Дж
			от нейтронов	от гамма разогрева	
0,267	6,13553	1,64	51,128	0,086	503,39

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ АУ

Результаты проведенных расчетов были в дальнейшем использованы при выборе окончательной конструкции экспериментального ампульного устройства и режимов проведения реакторных пусков.

При выборе конструкции АУ был проведен комплексный анализ, при котором было учтено несколько важных требований:

- по удельной скорости наработки трития в образце литневой КПС (требования определялись исходя из условий, моделирующих условия работы КПС в реальных ТЯР);
- по абсолютной скорости наработки трития в образце литневой КПС (требования определялись исходя из чувствительности системы регистрации трития на стенде «Лиана», для того чтобы достичь целей эксперимента – зафиксировать квазиравновесный поток выделения трития);
- учет возможностей системы контроля и регулировки температуры образца литневой КПС (необходимость ограничить размеры (толщину и высоту) образца с целью снижения температурного градиента, т.е. желательно исследовать образец с небольшими размерами).

В результате комплексного анализа была выбрана конструкция ампульного устройства, чертеж которого показан на рисунке 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных нейтронно-физических расчетов АУ определены скорости наработки трития в образце литневой КПС. Было показано, что существует неравномерность в распределении скорости наработки трития по высоте образца, которая в целом отражает существующую неравномерность в нейтронном потоке по высоте АЗ реактора.

Рассчитанная скорость наработки трития во всем образце зависит от объема образца, она прямо пропорциональна объему образца (для толщин 0,5 мм и

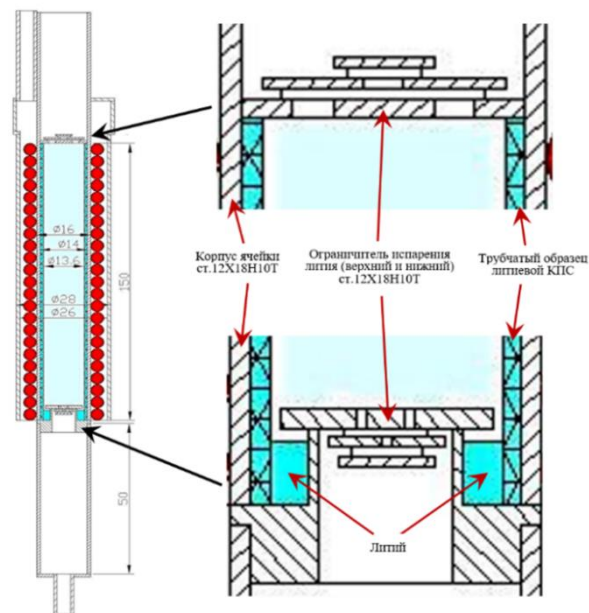


Рисунок 9. Конструкция ампульного устройства

1,5 мм) и имеет несколько неравномерную зависимость для образцов толщиной 1 мм. Удельная усредненная скорость наработки трития в образце существенно зависит от толщины образца, и чем тоньше образец, тем эта скорость выше.

Результаты расчетов были использованы при выборе экспериментального ампульного устройства и режимов проведения реакторных пусков.

Для выбранного варианта АУ определены значения энергосвечения в образце КПС для мощности пуска реактора 6 МВт. В целом энергетический выход реакции синтеза пропорционален плотности потока тепловых нейтронов, облучающих КПС, массе мишени и зависит от формы облучаемого тела – площади поверхности и толщины пластины из КПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Module of lithium divertor for KTM tokamak / M. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2012. V. 87. Issue 10. P. 1719–1723.
2. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak / Mikhail Yu. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2013. V. 88. Issues 9–10. P. 1862–1865.
3. Физико-химические основы использования лития в жидкометаллических системах термоядерного реактора / И.Е. Люблинский [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2007. Вып. 4. С. 13–44.
4. Experimental and calculated basis of the lithium capillary system as divertor material / N.V. Antonov [et. al.] // J. Nucl. Mater. 1997. V. 241–243. P. 1190–1196.
5. Design, calculation and experimental studies for liquid metal system main parameters in support of the liquid lithium fusion reactor / V.A. Evtikhin [et al.] // www.iaea.org: International Atomic Energy Agency. URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_001_c7pdf7ftp_27.pdf.
6. Литий в энергетическом термоядерном реакторе/ И.Е. Люблинский [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2006, Вып. 3, с. 3–26.
7. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований / Э.С. Айтхожин, Ф.М. Аринкин, Г.А. Батырбеков [и др.]: препринт НЯЦ РК-00-12. – Курчатов, 2000. – 75 с.
8. Briesmeister, J. F. MCNP – a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport / J.F. Briesmeister [et al.]. – Los Alamos, 1997. – LA-7396M.
9. MacFarlane, R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2. – Los Alamos, 1994.– LA-12639-MS.

**ЛИТИЙ ККЖ ИВГ.1М РЕАКТОРЫНДА СӘУЛЕЛЕНДІРУ КЕЗІНДЕ ^3H , ^4He АТҚАРЫМ
ЖЫЛДАМДЫҚТАРЫНЫҢ ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯСЫН БӨЛҮДІҢ ЕСЕПТІК БАҒАЛАУЛАРЫ**

¹⁾ И.В. Прозорова, ¹⁾ М.К. Скаков, ¹⁾ И.Л. Тажибаева, ¹⁾ Ю.В. Понкратов, ^{1, 2)} Т.В. Кульсартов

¹⁾ ҚР ҰАО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов., Қазақстан

²⁾ Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Эксперименттік және теориялық физика
ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

Мақалада литий ККЖ үлгілерін сәулелендіру үшін ампульдік құрылғының негізгі параметрларын таңдау бойынша есептік зерттеулердің нәтижелері; литий ККЖ ИВГ.1М реакторында сәулелендіру кезінде тритий және гелий иондарының атқарымдар жылдамдықтарын және энергияны бөлуді бағалау келтірілді. Жұмыстың маңыздылығы плазмаға айналдырылған материал ретінде келешек ТЯР литийді пайдалану келешектерімен келісілген. Осы жұмыс қазіргі токамактарда ККЖ пайдаланумен литий технологияларын ілгері бастыруға мүмкіндік береді және келешек термоядролық энергияның демонстрациялық және коммерциялық көздерін жобалау негіздерін дамытуға бағытталған.

Жұмыс Халықаралық ғылыми-техникалық орталықтың қолдауында орындалды (Грант № К-2204). «Литий ККЖ реакторлық сынақтары» жобасы.

**CALCULATED ESTIMATES OF ENERGY RELEASE AND RATES OF ^3H , ^4He
PRODUCTION IN LITHIUM KPS WITH IRRADIATION AT THE REACTOR IVG.1M**

¹⁾ I.V. Prozorova, ¹⁾ M.K. Skakov, ¹⁾ I.L. Tazhibayeva, ¹⁾ Yu.V. Ponkratov, ^{1, 2)} T.V. Kulsartov

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics
of Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

The article presents the results of computational studies on the selection of the main parameters of an ampoule device for irradiating samples of lithium CPS; estimates of energy release and rates of the production of tritium and helium ions in lithium KPS when it is irradiated at the reactor IVG.1M. The urgency of the work is due to the prospects for using lithium in future TIR as a plasma-converting material. This work will promote the promotion of lithium technologies using KPS in modern tokamaks and directed at developing the basics of designing demonstration and commercial sources of future fusion energy.

The International Science and Technology Center (Grant No. supported the work K-2204). Project “Reactor tests of lithium-ion-cooled batteries”.