

*Аристов Н. М., Васютин Н. А., Литовченко В. Ю., Таишыков О. Л.*

## **ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИМИ КЕРАМИКАМИ И БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИМИ СПЛАВАМИ В РЕАКТОРЕ ИВВ-2М ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ВЫХОДА ТРИТИЯ**

*Аннотация.* В работе рассматривается возможность проведения в активной зоне реактора ИВВ-2М облучения функциональных материалов, предполагается использовать в качестве кандидатов для blankets термоядерного реактора ИТЭР. Изложены данные нейтронно-физических, а также теплофизических расчетов, подтверждающих возможность проведения облучения, показаны разработанные ампулы для проведения облучения.

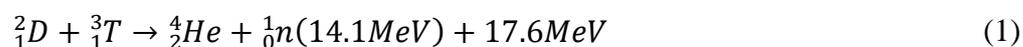
*Ключевые слова:* ИВВ-2М, ИТЭР, blanket, облучение, тритий.

*Abstract.* The paper considers the possibility of irradiation of functional materials in IVV-2M reactor core that intended to be used as candidates for the blanket of ITER thermonuclear reactor. There are neutronic and thermophysical data provided that confirms the possibility of irradiation, and ampules, designed for irradiation are provided.

*Keywords:* IVV-2M, ITER, blanket, irradiation, tritium.

### **Введение**

В настоящее время среди перспективных энергетических технологий рассматривается термоядерный синтез. Термоядерные реакции протекают на легких ядрах, при этом в ходе таких реакций выделяется большое количество энергии. Проблема осуществления контролируемого ядерного синтеза заключается в том, что реакции протекают при высоких температурах (10<sup>8</sup> °С и выше). Для осуществления контролируемого ядерного синтеза одной из перспективных считается реакция слияния ядер дейтерия и трития:



В термоядерном реакторе необходимо соблюсти условия, при которых плазма, обладающая высокой температурой, удерживается таким образом, чтобы, во-первых, затраты на ее удержание не превышали полезный выход реакции, а во-вторых, чтобы имелась возможность использовать энергию, выделившуюся в ходе реакции. Для утилизации энергии используется специальная оболочка вокруг плазмы – blanket (blanket) [1,2]. Материал blankets должен иметь небольшую толщину, в случае если плазма удерживается электромагнитным способом, чтобы снизить затраты на ее удержание, а также эффективно преобразовывать энергию

налетающих нейтронов в тепло. В дополнение, для длительного поддержания реакции синтеза необходимо восполнять запасы трития.

Таким образом, для материалов blankets выдвигаются следующие требования:

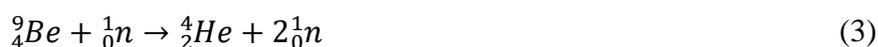
- необходимо, чтобы материал был способен выделять тритий в достаточном количестве для поддержания термоядерной реакции;
- необходимо, чтобы материал был способен утилизировать энергию налетающих быстрых нейтронов.

Для первой категории материалов кандидатами считаются литийсодержащие керамики (размножители – Ceramic breeders). Изотоп Li-6 может в ходе реакции



выделять значительное количество трития. В данной работе в качестве рассматриваемых материалов выступают керамики метатитанат лития, ортисиликат лития, цирконат лития:  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  (керамики для простоты названы LMT, LOS и LTZO, последняя является смесью титаната и цирконата лития). В blankets они используются в виде сферических гранул диаметром 1 мм. Обогащение лития в керамиках по Li-6 может достигать 95%.

Для второй категории материалов можно использовать сплавы на основе бериллия (материалы-умножители нейтронов – neutron multipliers). Be-9 является размножителем нейтронов, поскольку в термоядерном реакторе возможно использовать реакцию:



Полученные таким образом нейтроны можно использовать для воспроизводства трития. В данной работе рассматривался чистый бериллий, а также некоторые интерметаллиды на его основе: бериллиды ванадия, титана, хрома – Be,  $\text{Be}_{12}\text{V}$ ,  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ ,  $\text{Be}_{12}\text{V}_{0.9}\text{Ti}_{0.1}$ ,  $\text{Be}_{12}\text{Cr}$ .

Имеется возможность также использовать материалы, содержащие лантан  $\text{LaPb}_3$ , поскольку он также способен к размножению нейтронов за счет протекания реакций  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ ,  $(n, 4n)$ .

Материалы blankets испытывают большие радиационные повреждения, обусловленные действием на них быстрых нейтронов [3]. При этом, на 10% выгорания Li-6 в керамике, повреждающая доза может достигать 20–25 СНА. Под действием нейтронного облучения происходит распухание материала, а внутри

шариков возникают механические сжимающие напряжения, способные разрушить материал. Вдобавок, при выделении трития в шариках образуются поры, которые при облучении увеличиваются [4].

Целью работы стало изучение влияния нейтронного облучения при различных температурах на механические свойства материалов, а также на кинетику выхода трития из литийсодержащих керамик.

### **Постановка задач**

Работа разделена на две задачи: первая заключается в исследовании выхода трития при облучении рассматриваемых материалов, вторая – к организации облучения с последующим проведением послереакторных исследований.

В первой задаче рассматривались литийсодержащие керамики – смесь метатитаната и ортосиликата лития в пропорции 30 мол.%  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  + 70 мол.%  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  с обогащением 90% по изотопу Li-6. Рассматривалось облучение образцов в виде шариковой засыпки с диаметром шариков 1 мм. Облучение необходимо производить в инертной среде ( $\text{He}-0,1\% \text{H}_2$ ), поскольку при контакте с воздухом, под действием паров воды, содержащихся в воздухе происходит быстрая деградация материала. В условиях высокой температуры облучения, данный процесс приведет к разрушению образцов. При облучении необходимо обеспечить продувку облучаемого материала, чтобы иметь возможность уводить нарабатываемый тритий из активной зоны реактора и доставлять его на измерительную часть экспериментального стенда. Температура образцов при облучении должна изменяться от 400 до 900 °С с шагом в 100-150 градусов. Также, необходимо выдержать ступенчатый режим изменения температуры, например, зафиксировать температуру 550 °С до установления стационарного выхода трития, а затем поднять температуру до 900 °С и также выдержать время, чтобы интенсифицировать выход трития за пределы образцов за счет диффузии пор к поверхности.

Во второй задаче рассматриваемые образцы поделены на две группы: образцы нейтронного множителя – neutron multipliers (NM), а также образцы тритиевого размножителя – ceramic breeders (CB).

Образцы NM – бериллийсодержащие сплавы в форме дисков (пеллетов), в форме шариковой засыпки (пеллеты), а также в форме полнотелых цилиндров размещаются в многоярусных ампулах внутри отдельных пеналов. Пример размещения материалов внутри ампул приведен на рисунке 1. Все образцы также необходимо облучать при высокой температуре, однако в данном эксперименте температура на образцах постоянна. В данном случае, исследуется радиационная повреждаемость образцов при высоких температурах. Диапазон температур

облучения выбран от 350 до 900 °С с шагом 150 градусов. Рассматривалась также возможность достижения высокотемпературных режимов облучения для образцов  $\text{LaPb}_3$ .

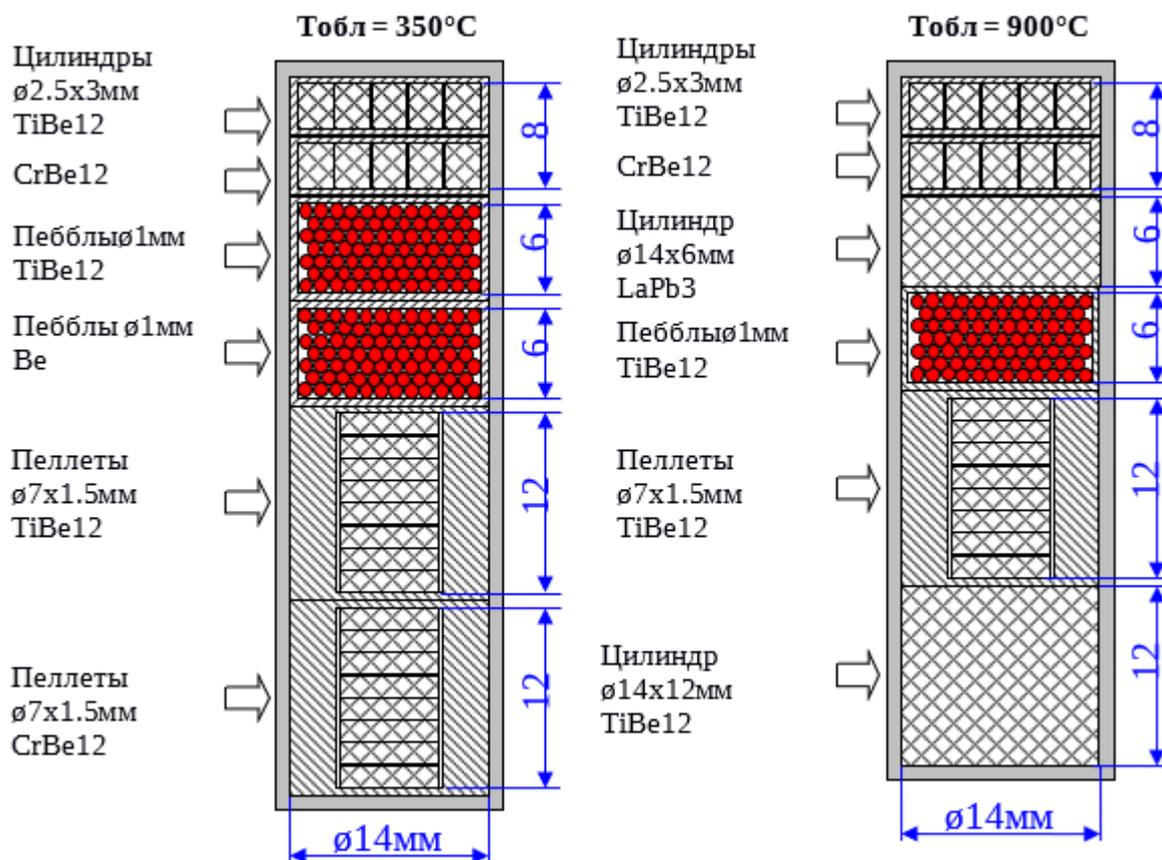


Рисунок 1 – Пример компоновки ампул с бериллийсодержащими образцами

Образцы СВ – литийсодержащие керамики, чистые метатитанат и ортосиликат лития в форме дисковых образцов, либо же их смеси в форме шариковых засыпок. Рассматривалось два варианта обогащения образцов по изотопу  $\text{Li-6}$  – 90% и 60%. Меньшее обогащение рассматривалось по причине высокого удельного на грамм энерговыделения, при котором не удавалось при расчетах получить низкотемпературные режимы облучения. Данные образцы облучаются в отдельных ампулах и при меньшей массе самого образца (не более 2 грамм на ампулу), данная мера принята для возможности регулирования диапазона температур на образцах не только вверх, но и вниз за счет варьирования смеси продувочного газа.

Обязательным условием облучения является набор повреждающей дозы на облучаемых образцах не менее 3 СНА за период облучения. Поскольку энергетический спектр реактора ИВВ-2М отличается от спектра реактора ИТЭР, имеет значение увеличение соотношения накапливаемой повреждающей дозы в

образцах к их выгоранию. Период облучения ограничен 1 календарным годом, ввиду особенностей проведения эксперимента, поэтому при рассмотрении ячеек для размещения облучаемых материалов с образцами следует учесть особенности накопления повреждающей дозы в активной зоне реактора, а также рассмотреть возможность использования защитных экранов, которые отрежут низкоэнергетическую составляющую спектра нейтронов, тем самым снизив выгорание материалов (в особенности это касается литийсодержащих керамик).

Для подтверждения возможности проведения облучения образцов необходимо провести расчеты нейтронно-физических и теплофизических характеристик. При проведении расчетов необходимо получить следующие характеристики эксперимента:

- скорость реакции образования трития для литийсодержащих образцов для оценки наработки трития за период облучения;
- накопление повреждающей дозы образцами, а также скорость реакции выгорания образцов для оценки соотношения повреждающей дозы и выгорания материала;
- энерговыделение в образцах, для того, чтобы провести теплофизический расчет и получить распределение температуры в образцах;
- температурное распределение в образцах для оценки выполнимости соблюдения заданных температурных режимов.

Расчеты нейтронно-физических характеристик эксперимента проведены в расчетном коде, использующем метод Монте-Карло. Теплофизические параметры получены с использованием расчетной программы ANSYS (Fluent).

### **Условия проведения эксперимента**

Активная зона ИЯР ИВВ-2М состоит из ТВС, бериллиевых блоков, выступающих в качестве отражателя, а также экспериментальных устройств, используемых для решения научно-исследовательских и производственных задач. Зона поделена на секции: имеется центральная секция, а также 6 секций, примыкающих к ней (рисунок 2). Конструктивные решения и блочная структура активной зоны и отражателя, однотипность и взаимозаменяемость элементов активной зоны позволяет создавать различные компоновки активной зоны, изменять количество секций, их размеры и размещение в опорной решётке, а также варьировать размерами экспериментальных устройств и их нейтронно-физическими и теплотехническими характеристиками.

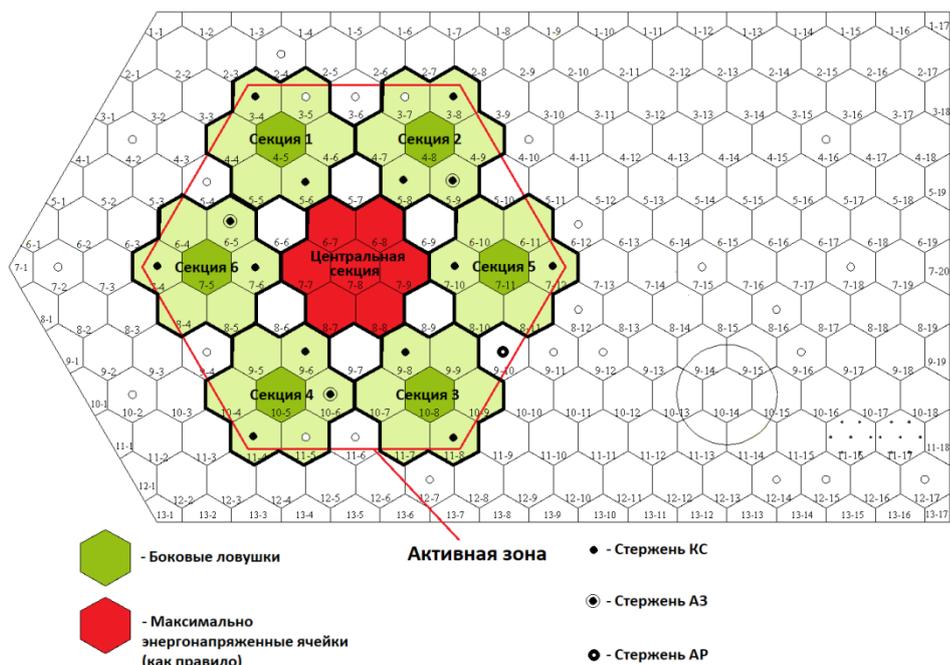


Рисунок 2 – Активная зона ИЯР ИВВ-2М

При выборе ячеек для размещения облучаемых устройств были рассмотрены варианты облучения образцов в боковых ловушках активной зоны. Однако, данные ячейки не обеспечивают необходимые нейтронно-физические характеристики, в частности, повреждающая доза 3 СНА в течение года не накапливается, при этом выгорание образцов превышает 15%, а высокое энерговыделение (около 110-120 Вт/г) не позволяет достичь температурных режимов – литийсодержащие образцы нагреваются более 600 °С. Поэтому, при проектировании устройств для проведения послереакторных исследований рассмотрена возможность облучения образцов внутри полостей ТВС, расположенных в периферийных внешних секциях активной зоны. Внутри полостей ТВС энергетический спектр нейтронов более жесткий, по сравнению с боковыми ловушками, что приводит к быстрому набору образцами повреждающей дозы, в результате имеется возможность с использованием тонкостенного кадмиевого экрана добиться для литийсодержащих образцов соотношения 3 СНА к 12% выгорания лития в течение 9-10 месяцев облучения.

Для облучения образцов с измерением выхода трития, размещение внутри полости ТВС не представляется возможным. В данной эксперименте необходима организация двух независимых газовых контуров, а также использование защитных экранов, снижающих энерговыделение в образцах для обеспечения температуры на образцах 400 – 500 °С, что приводит к увеличению габаритов устройства. Поэтому, данные образцы принято решение облучать в боковой ловушке секции 4.

## Результаты и обсуждение

В результате проведенных расчетов были получены данные, которые позволили спроектировать облучательные устройства для проведения полномасштабного эксперимента. Облучательные устройства обеспечивают соблюдение требуемых нейтронно-физических и теплофизических режимов.

Устройства для облучения образцов с последующими послереакторными исследованиями представляют собой герметичный газовый чехол, размещаемый в полости ТВС. Внутри чехла расположена газовая трубка, которая проходит через центральное сечение ампул облучаемыми образцами для организации продувки с целью удаления трития, выделяющегося при облучении. Продувочный газ спускается по трубке вниз, а затем выходит во внутреннее пространство чехла, омывает ампулы и выходит через отводную трубку в верхней части чехла. Ампулы расположены внутри газового чехла и закреплены на продувочной трубке. Между стенками ампул и внутренней стенкой чехла имеется газовый зазор, через который протекает продувочный газ. Зазор также служит для целей регулирования температуры. Для контроля температуры образцов, внутри стенок ампул размещены термопары.

Облучение образцов NM и СВ необходимо проводить внутри отдельных устройств. Это сделано во избежание загрязнения бериллийсодержащих материалов тритием, поскольку имеется вероятность негерметичного запечатывания ампул с бериллийсодержащими образцами.

При облучении литийсодержащих образцов принято решение использовать кадмиевые тонкостенные экраны (толщина 2 мм), которые будут размещаться в плотную к внешней стенке. Это позволяет снизить энерговыделение внутри образцов таким образом, что при использовании в качестве продувочного газа гелия удастся обеспечить температуру 350 °С, а при использовании большего газового зазора и с продувкой неоном удастся получить температуры свыше 900 °С.

При расчетах было установлено, что для облучения образцов в форме шариковых засыпок, оптимальной конфигурацией является кольцевая засыпка в 3-4 слоя шариков. Во-первых, шарики имеют невысокую теплопроводность, поэтому укладка с большим числом слоев или же засыпка в цилиндрический объем приводит к появлению радиальной температурной неравномерности более 50 °С на образцах. В данном эксперименте это приводит к неравномерной повреждаемости образцов. Во-вторых, при облучении в цилиндрическом объеме происходит неравномерный набор повреждающей дозы образцами. Конечно, имеется азимутальная неравномерность, но при засыпке в большее число слоев, к ней добавляется и радиальная неравномерность. При наборе периферийными образцами повреждающей дозы 3 СНА, центральные набирают около 2.8 СНА.

Ампулы для облучения бериллийсодержащих образцов отличаются от ампул с литийсодержащими образцами. Они не имеют центральной продувочной трубки, поскольку внутри размещены цилиндрические образцы большого диаметра. Для данных образцов не требуется понижение удельного энерговыделения, поэтому облучение происходит без использования кадмиевых экранов.

Основной разогрев бериллийсодержащих образцов происходит за счет гамма-облучения, при этом удельное массовое энерговыделение составляет около 5-6 Вт/г. Однако, при проведении расчетов установлено, что образцы  $\text{LaPb}_3$  имеют более высокое энерговыделение, так в центральном сечении активной зоны для данных образцов оно составляет около 8.2 Вт/г. Учитывая высокую плотность образца, это становится проблемой, поскольку данные образцы по сравнению с бериллиевыми имеют гораздо большее абсолютное тепловыделение, что приводит к появлению осевых температурных неравномерностей в ампулах с образцами более  $50^\circ\text{C}$ . В результате, после анализа расчетных данных решено было отказаться от облучения данных образцов, признав невозможным их размещение в ампулах.

Для облучения образцов с исследованием выхода трития принято решение использовать устройство не чехлового, а ампульного типа. Эскиз показан на рисунке 3. Устройство состоит из двух ампул, на рисунке показана высокотемпературная ампула.

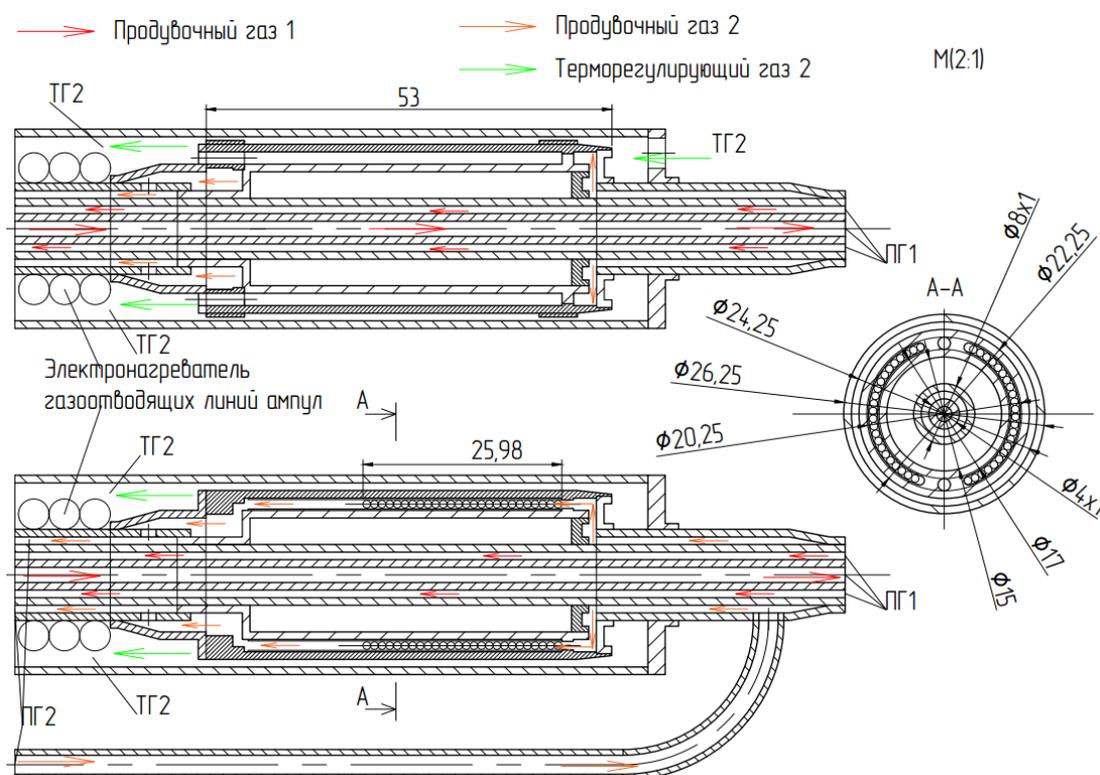


Рисунок 3 – Эскиз ампулы для облучения образцов с исследованием выхода трития

Низкотемпературная ампула конструктивно практически не отличается от нее. Ампулы по высоте расположены симметрично центра активной зоны, низкотемпературная расположена ниже центра.

Данное устройство имеет два независимых газовых контура: продувочный, предназначенный для удаления трития и терморегулирующий, в котором находится газ, изменяемый в процессе облучения. Облучаемые образцы представляют собой шариковую засыпку с диаметром шариков 1 мм, расположенную внутри металлической гильзы, в которой проточены две полукольцевые полости. Такое расположение позволяет максимально увеличить удельное массовое энерговыделение внутри шариков, при этом сохраняя возможность регулировать температуру в заданных пределах. Также, размещение шариков в полости в один ряд позволяет снизить температурные неравномерности по высоте и радиусу засыпок – в данной ампуле неравномерность составляет менее 30 °С.

Для данного эксперимента был рассчитан теоретический выход трития, в расчет не принят механизм кинетики выхода трития. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Нарботка трития в эксперименте с исследованием выхода трития

Облучаемый материал	Нарботка трития в начале облучения, Бк/с	Генерация трития за 1-й реакторный цикл, Ки
Капсула 1 (600–900 °С): 30LMT90		
засыпка 1a	$(1.11 \pm 0.2) \cdot 10^5$	$4.95 \pm 0.07$
засыпка 1b	$(1.08 \pm 0.3) \cdot 10^5$	$4.82 \pm 0.07$
Итого:		$9.77 \pm 0.07$
Капсула 2 (400–650 °С): 30LMT90		
засыпка 2a	$(7.41 \pm 0.1) \cdot 10^4$	$5.56 \pm 0.07$
засыпка 2b	$(6.98 \pm 0.1) \cdot 10^4$	$5.24 \pm 0.07$
Итого:		$10.80 \pm 0.07$

По приведенным данным можно сделать вывод о максимальном возможном количестве трития, который будет регистрироваться в течение одного реакторного цикла в случае, когда весь тритий, наработанный в течение цикла выйдет из образца.

### Заключение

На основании данных, полученных в ходе работы, сделан вывод о возможности проведения облучения материалов, которые рассматриваются в

качестве кандидатов для blankets реактора ИТЭР в активной зоне реактора ИВВ-2М. По результатам нейтронно-физических и теплофизических расчетов спроектированы облучательные устройства, позволяющие достичь требуемых параметров облучения.

Принято решение провести облучение теплофизических макетов в 2022 году, с целью практического подтверждения полученных расчетных параметров, а также с целью проведения дальнейшего полномасштабного эксперимента по облучению образцов.

#### ***Библиографический список***

1. Progress in technology at JET / A. S. Kaye, H. Altman, R. Albanese [et al.]. – DOI 10.13182/FST05-A716 // Fusion Science and Technology. – 2005. – Vol. 636. – P. 602–607.
2. Scientific and engineering advances from fusion materials / S. J. Zinkle, M. Victoria, K. Abe. – DOI 10.1016/S0022-3115(02)01088-7 // Journal of Nuclear Materials. – 2002. – Vol. 31. – P. 307–311.
3. Капышев В. К. Воздействие нейтронного облучения на прочностные свойства керамических литийсодержащих таблеток, предназначенных для blankets термоядерных реакторов / В. К. Капышев // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». – 2001. – Вып. 1. – С. 51–57.
4. Analysis of tritium retention in beryllium pebbles in EXOTIC, PBA and HODOBE-01 experiments / A. V. Fedorov, S. van Til, L. J. Magielsen, M. P. Stijkel. – DOI 10.1016/j.jnucmat.2013.03.010 // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 442. – P. 1–3.