

Работы, проводимые с тритием в РФ

А. А. Юхимчук

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская обл., Россия
arkad@triton.vniief.ru

В статье приведен обзор работ, выполненных в РФ различными научными организациями по тритиевой тематике за период с 2001 года по настоящее время. В работе рассмотрены практически все аспекты обращения с тритием и его соединениями: производство трития, исследования в области фундаментальной и прикладной науки с использованием трития, применение трития в термоядерных программах, влияние трития на свойства конструкционных материалов, создание технологического оборудования для работы с тритием и его соединениями, создание технологий утилизации тритиевых отходов, изучение влияния трития на окружающую среду и биосферу, производство светознаков.

Производство трития

В России тритий производился на реакторах Производственного объединения «Маяк» [1, 2]. Выделение трития из литиевых блоков и последующее его доведение до товарного продукта осуществляется на химическом производстве ПО «Маяк» [3]. В 2000–2009 годах проведено переоснащение этого производства современными криогенными разделительными установками. В этих работах, кроме ПО «Маяк», принимали участие сотрудники РХТУ им. Д. И. Менделеева и ОАО «Криогенмаш». В настоящее время ПО «Маяк» в полном объеме удовлетворяет потребности различных организаций РФ в тритии и гелии-3, как продукта распада трития, который поставляется на экспорт [4].

Исследования в области фундаментальной и прикладной науки

Мюонный катализ ядерных реакций синтеза

В России проведен обширный комплекс работ направленных на систематическое изучение явления мюонного катализа ядерных реакций синтеза (МКЯРС) в смесях изотопов водорода. Результаты этих работ (см., например, [5–16]) могут быть обобщены следующим образом. В 1995–1996 гг. создан комплекс ТРИТОН, обеспечивающий безопасное проведение работ с тритием и его смесями с дейтерием и протием при активности трития в эксперименте до 10 кКи [7]. В ходе эксплуатации комплекса он оснащался 7 типами различных мишеней [8–10], позволяющими проводить исследования в диапазоне температур 20–800 К и давлений до 150 МПа.

Получены параметры dt -цикла в широком диапазоне условий для равновесной смеси дейтерия и трития при температурах 20–800 К, плотности 0,2–1,2 от плотности жидкого водорода и концентрациях трития 15–86 %. Экспериментальный материал, полученный с применением новых методов анализа, содержит данные об основных характеристиках процессов МКЯРС: скорости цикла, выходе нейтронов, коэффициенте прилипания мюона к радиогенному гелию для более чем 80 наборов условий D/T смеси и является рекордным по полноте и по точности. В качестве примера на рис. 1 представлена зависимость скорости цикла МК от температуры и концентрации трития.

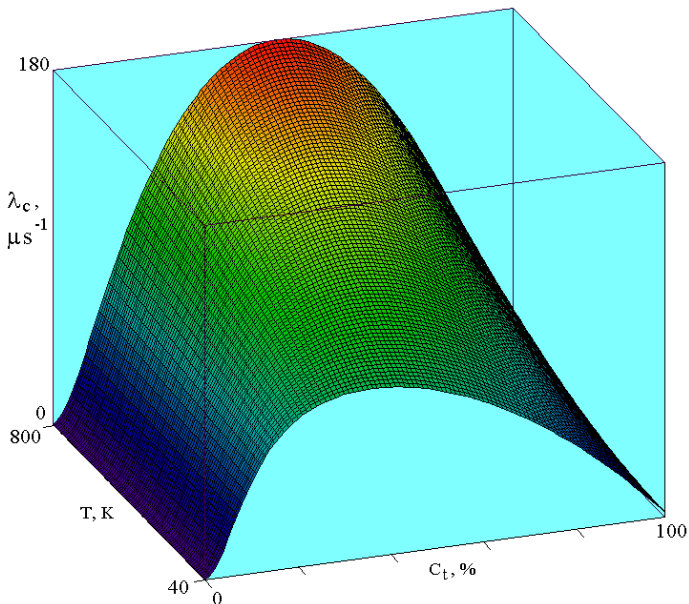


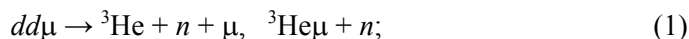
Рис. 1. Зависимость скорости цикла МК в D/T смеси от температуры и концентрации трития

Впервые проведены исследования явления мюонного катализа в плотной тройной смеси изотопов водорода при температурах 20–800 К и плотностях 0,4–1,2 от плотности жидкого водорода. Определены зависимости параметров процесса (скорости цикла, выхода нейтронов, потери мюонов в цикле) от температуры и плотности. Зарегистрированы эпитермальные эффекты в реакциях столкновений нетермализованных мю-атомов с молекулами тройной смеси H/D/T [11]. Впервые измерены параметры МКЯРС в дейтерии при температурах от 80 до 800 К. Полученные зависимости скоростей образования мюонных молекул $d\mu d$ с ростом температуры дейтерия, подтверждают резонансный механизм этого процесса [12].

С рекордной точностью измерены параметры цикла МКЯРС в среде чистого трития: скорость образования $t\mu t$ мезомолекулы $\lambda_{t\mu} = 2,84(0,32) \text{ мкс}^{-1}$, скорость реакции tt -синтеза $\lambda_f = 15,6(2,0) \text{ мкс}^{-1}$, вероятность прилипания мюона к гелию $\omega_{\mu} = 13,9(1,5) \%$. Кроме того сделан вывод о существенной α - n корреляции в конечном состоянии реакции $t\mu t \rightarrow {}^4\text{He} + n + n + \mu$ [13].

В ходе экспериментов измерено, что в жидкой D/T смеси один мюон может катализировать 120 ± 15 актов синтеза. Это не позволяет говорить о создании энергетического реактора на базе МКЯРС, однако вполне приемлемо для создания интенсивного источника нейтронов (ИИН) с энергией 14 МэВ [14, 15] для испытаний конструкционных материалов будущих термоядерных реакторов.

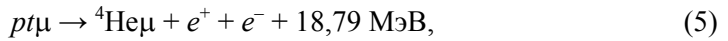
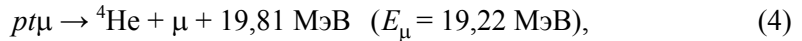
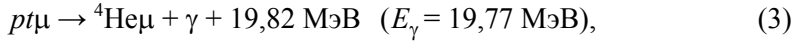
В 2010 г. были завершены экспериментальные работы по изучению реакции радиационного захвата в молекуле $dd\mu$ из состояния $J = 1: d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ [16]. С использованием специально созданных для этих целей мишени и системы детектирования был найден верхний предел относительного выхода этой реакции на уровне $8 \cdot 10^{-7}$ по отношению к основным каналам:



Данный результат согласуется с величиной $(5-10) \cdot 10^{-7}$, ранее полученной в работе [17].

В 2016 г. были завершены работы по исследованию реакции pt -синтеза между ядрами молекул $p\mu t$. Для этого РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ОИЯИ создали жидкотритиевую мишень [18] со следующими рабочими параметрами: количеством протий-тритиевой смеси в мишени ~ 40 л н.у.; точностью поддержания температуры во времени не хуже $\pm 0,05$ К; максимальным давлением в объеме мишени не более 4 МПа. Для обеспечения безопасности при работах с тритийсодержащими смесями конструкция мишенного блока включает три рубежа защиты, исключающих попадание трития в воздушную среду рабочих помещений.

С использованием данной ЖТМ на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ проведены исследования с двумя концентрациями жидкой pt смеси (0,86 и 0,1 % трития), в ходе которых наблюдались следующие каналы реакции $p\mu t$ -синтеза [19]:



Причем, каналы (5) и (6) обнаружены впервые. Предварительные результаты подтверждают теоретические предсказания, высказанные Я. Б. Зельдовичем и С. С. Герштейном [20] в 1960 году о продуктах выхода в ядерных реакциях в холодном водороде с участием мюонов.

За 20 лет в ходе экспериментов на комплексе ТРИТОН было использовано более 100 кКи трития, при этом с целью экономии трития, в ряде экспериментов для подготовки различных ДТ и НДТ-смесей тритий использовался многократно. За это время кроме смены мишеней на комплексе был заменен масляный форвакуумный насос 2НВР-5ДМ на безмасляный GVSP-30, в одном из форвакуумных насосов АВЗ-20 проведена замена электродвигателя. Также, для ускорения процесса подготовки газовых смесей, конструкция нагревателя урановой ловушки, предназначенной для подготовки и хранения смесей изотопов водорода, была оснащена проточной системой охлаждения с использованием паров жидкого азота. В ходе работы постоянно совершенствовалась система контроля и управления (СКУ). Так на стадии создания комплекса его СКУ создавалась в двух вариантах – полуавтоматическом с регистрацией параметров с помощью механических самописцев (основной вариант) и полностью автоматическом с регистрацией и управлением комплексом через управляющий компьютер (дублирующий вариант). В начале 2000^х годов СКУ была полностью переведена в автоматический режим работы [21] и далее изменялась лишь в части касающейся мишеней.

Ремонтно-монтажные работы с оборудованием, контактировавшим с тритием на комплексе, проводятся в средствах индивидуальной защиты (пневмокостюмы и пневмокуртки) при постоянном дозиметрическом контроле проводимых операций. В процессе эксплуатации комплекса превышений допустимых норм радиационной обстановки и внутреннего облучения персонала не зафиксировано.

Научная программа, с учетом возможностей фазотрона ЛЯП ОИЯИ, выполнена полностью. В связи с этим принято решение об утилизации комплекса. В 2018 году комплекс ТРИТОН выведен из эксплуатации, на нем проведены комплексные радиационные исследования и в настоящее время проводятся плановые работы по его утилизации. Окончательная утилизация комплекса планируется в 2020 году.

Исследований легких нейтронно – избыточных ядер

Для исследования структуры атомных ядер, находящихся на границе стабильности по отношению к самопроизвольному испусканию нейтрона коллаборацией РФЯЦ-ВНИИЭФ и ЛЯР ОИЯИ в 1999–2002 гг. были созданы система подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона У-400М, обеспечившая получение в ЛЯР ОИЯИ пучка ядер трития с энергией ~58 МэВ

и интенсивностью 10^6 с^{-1} [22], серия уникальных тритиевых мишеней и комплекс их газового обеспечения [23]. Основные результаты экспериментов, проведенных на этом комплексе оборудования, подробно изложены в работе [24]. Дальнейшее развитие работ в этом направлении связано с созданием и запуском в работу в 2017 г. фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 [25]. В настоящее время ведутся ОКР по созданию инфраструктуры для размещения на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 оборудования, обеспечивающего радиационно-безопасное проведение работ с тритиевыми мишенями. Планируется создание помещения 2 класса для проведения работ с тритием общей активностью не более 2,7 кКи. Тритиевое помещение размещается над реакционной камерой, в нем располагается герметичный прокачной бокс с оборудованием для заполнения мишени, ресивер для сбора «хвостов» от систем вакуумирования технологического оборудования, установка очистки среды бокса и ресивера от трития. В этом помещении производится установка тритиевой сборки на криогенную головку, заполнение сборки тритием, проведение необходимых работ и проверок для аттестации тритиевой сборки как источника радионуклидного закрытого (ИРЗ). Далее ИРЗ опускается и монтируется в реакционную камеру фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 для проведения исследований. Создание тритиевой инфраструктуры и оборудования планируется завершить в 2021 году.

Интенсивный тритиевый источник (анти)нейтрино

Одной из фундаментальных проблем физики нейтрино являются поиски электромагнитных свойств этой частицы. Несмотря на отсутствие заряда, предполагается, что нейтрино может обладать электромагнитным моментом. Для измерения магнитного момента нейтрино (ММН) на уровне $\mu_\nu \approx (2-3) \cdot 10^{-12} \mu_B$ авторами работы [26] было предложено использовать интенсивный тритиевый источник нейтрино (ИТИН) активностью 40 МКи (4 кг трития), что позволяло получать в компактной сборке потоки (анти)нейтрино на уровне $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Дальнейшие работы были направлены на оптимизацию такого ИТИН для проведения измерений ММН с использованием кремниевых криогенных либо (и) германиевых лавинных детекторов [27–29]. Работы осуществлялись при поддержке Минатома РФ (контракт № 650-5-19) и АФГИР (грант № RP2-2383-МО-02). К сожалению, к моменту окончания финансирования этих исследований, детекторов способных регистрировать энергию отдачи электронов 10–30 эВ в процессе рассеяния (анти)нейтрино на электроны создано не было и работы были прекращены.

Позже сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» для регистрации ММН было предложено использовать эффект рассеяния нейтрино на электронах атомов жидкого гелия [30]. Согласно оценкам в области переданной энергии до 1 кэВ в канале электромагнитного взаимодействия наблюдается значительное увеличение сечений по сравнению с сечениями упругого рассеяния на свободном электроны. При использовании детектора с 10 кг жидкого гелия и ИТИН с активностью 40 МКи можно получить ограничение на лабо-

раторный предел ММН на уровне 10^{-12} $\mu\text{В}$ (в 10 раз меньше существующих ограничений).

В связи с перспективой создания и использования жидкогелиевого детектора, были возобновлены работы по созданию и использованию ИТИН активностью до 40 МКи. В ходе этих работ ИТИН был адаптирован к его использованию совместно с новым детектором, проработаны вопросы обращения с ним на всех этапах жизненного цикла, нормативно-правового обеспечения работ и места проведения эксперимента. Кроме того, был создан прототип элементов ИТИН, проведены исследования и показана возможность обеспечения безопасности обращения с ИТИН активностью до 40 МКи на всех этапах его жизненного цикла [31]. Однако, до настоящего времени детекторы с необходимой чувствительностью так и не созданы.

В ходе всех этих работ были проработаны конструкция и технология создания ИТИН, проработаны нормативные и правовые вопросы обращения с большими количествами трития и разработчики ИТИН готовы обсуждать предложения по возможностям его использования для фундаментальных исследований.

Исследования в области термоядерного синтеза

В 2015 г. завершена фаза концептуальной разработки российско-итальянского проекта по осуществлению зажигания плотной D-T-плазмы, удерживаемой магнитными полями в токамаке Игнитор, предложенного командой под руководством профессора Бруно Копи [32]. В настоящее время ожидается подписание международного проекта по строительству Игнитора. В качестве одного из возможных мест размещения токамака Игнитор предложена площадка ГНЦ РФ ТРИНИТИ в Троицке (г. Москва) [33]. В работе [33] была проанализирована достаточность существующей в ТРИНИТИ инфраструктуры для размещения Игнитора. Одним из аспектов говорящих в пользу выбора именно этой площадки является наличие в ТРИНИТИ лицензии на работу с 10 г трития. Исходя из этого ограничения по количеству трития, сотрудниками РХТУ им. Д. И. Менделеева и НИЦ «Курчатовский институт» предложена концепция тритиевого топливного цикла [34]. Согласно концепции, топливный цикл включает в себя: систему хранения дейтерия и трития в газовых баллонах под давлением 0,4 МПа; очистку отработанной газовой смеси из плазменной камеры с использованием «горячего геттера» на уране 238; разделение изотопной смеси дейтерия и трития методом вытеснительной газовой хроматографии; очистку технологических газовых потоков и воздуха с использованием мокрого скруббера; детритизацию водных потоков методом СЕСЕ (комбинированный процесс каталитического изотопного обмена в системе вода-водород на гидрофобном катализаторе с электролизом воды). В работе проведена оценка основных технических параметров аппаратов, включенных в состав технологической схемы.

Еще одной большой работой в этой области является разработка гибридного реактора «синтез – деление» ДЕМО-ТИН (DEMO-FNS) (ведущая организация НИЦ «Курчатовский институт»). В настоящее время эта работа находится на этапе разработки технического проекта (engineering design) и позиционируется в России как основной источник технологической и научной информации, направленной на поддержку результатов исследований в интересах ДЕМО в области физики горения плазмы, средств управления, тестирования материалов и отработки стационарных режимов работы всех систем токамака с КИУМ (коэффициент использования установленной мощности) равным 0,7 [35]. На рис. 2 представлен вид в разрезе токамака ДЕМО-ТИН. Основные технические характеристики на которые рассчитывается токамак: термоядерная мощность в установившемся режиме – 40 МВт; мощность от ядер деления, включая пережигание минорных актинидов и наработку топлива – до 400 МВт, при этом суммарная тепловая мощность в первом контуре до 500 МВт, а получаемая электрическая до 200 МВт; планируется осуществлять наработку трития и (или) других изотопов, также пережигать минорные актиниды за счет нейтронов деления в активной зоне blankets.

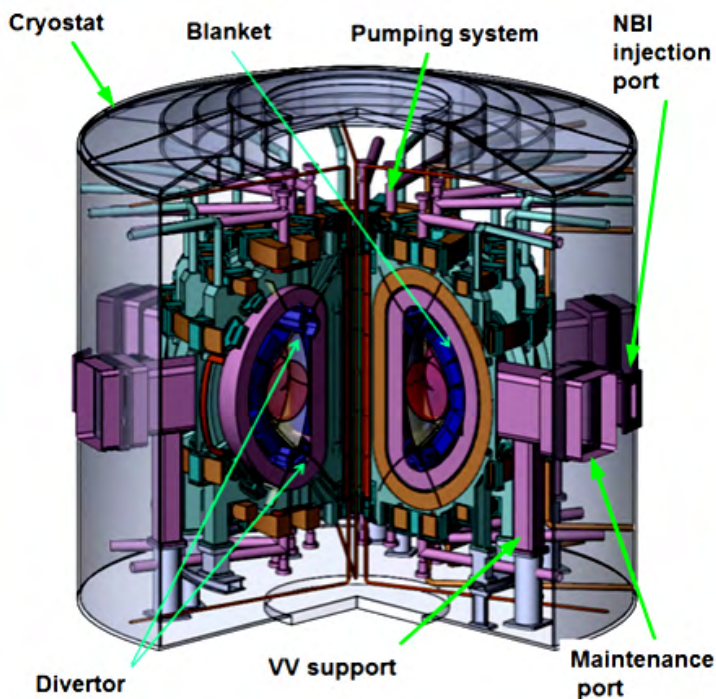


Рис. 2. Вид в разрезе токамака ДЕМО-ТИН

Для данного реактора в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается проект топливного цикла [36]. В [36] рассматривается два варианта работы токамака: с использованием тритиевого и безтритиевого нейтрального пучка. Получено, что в первом варианте общее накопление трития во всех элементах топливного цикла токамака составит ~ 1 кг, а во втором – 0,45 кг.

При этом суммарное выгорание трития при $KIUM = 0,7$ (в расчете учитывался и β -распад трития) за год составит $\sim 1,8$ кг для обоих вариантов.

Для испытаний элементов топливного цикла термоядерных реакторов во ВНИИЭФ (г. Саров) строится специальная инфраструктура.

Во ВНИИЭФ создается мощная лазерная установка для проведения исследований в области инерциального термоядерного синтеза [37]. В рамках этого проекта ведется создание инфраструктуры и установок для фабрики ДТ-мишеней и основной камеры взаимодействия. Тритиевая часть инфраструктуры предназначена для обеспечения безопасного проведения работ по наполнению мишеней ДТ смесью как диффузионным способом, так и через капилляр при криогенных температурах, а также для обеспечения безопасности работ с тритиевыми мишенями в камере взаимодействия. Установки размещены в герметичных боксах. Инфраструктура создается для работы с тритием по 2 классу (2,7 кКи). В настоящее время завершаются работы по изготовлению и монтажу соответствующих установок. Ввод в эксплуатацию первой очереди планируется в 2019 году.

Во ВНИИЭФ при научном руководстве профессора А. И. Лившица из СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича создана установка ПРОМЕТЕЙ [38] для изучения явления сверхпроницаемости и моделирования процессов короткоциклового разделения D/T смеси и He с помощью сверхпроницаемых мембран [39, 40]. В настоящее время рассматривается возможность реализации концепции короткоциклового разделения D/T смеси и He с помощью сверхпроницаемых мембран в пост-ИТРовских проектах, включая DEMO. Работа ведется в СПбГУТ совместно с Технологическим Институтом в Карлсруэ (KIT), который в свою очередь реализует проект, финансируемый EUROFUSION. В рамках этой совместной работы создается плазменно-мембранная установка ГЕРМЕС (с локализацией в KIT), предназначенная как для физических исследований, так и для разработки конкретных технологических решений. В частности, в России разрабатываются новые мембранные материалы на основе ОЦК сплавов ванадия с регулируемой растворимостью водорода, позволяющие удовлетворить условию по допустимому накоплению трития при плазменной генерации надтепловых водородных (D/T) частиц. Образцы сверхпроницаемых мембран из этих материалов испытываются в KIT.

Во ВНИИЭФ создан нейтронный источник с плазменным фокусом интенсивностью $1,3 \cdot 10^{13}$ ДТ нейтронов [41]. Для вакуумирования плазменной камеры перед началом экспериментов, подачи в нее дейтерия или эквимольной ДТ-смеси, а также утилизации этой смеси по завершению эксперимента была разработана система газового наполнения, позволяющая проводить данные работы в полевых условиях [7, 41]. Хранение дейтерия и ДТ-смеси осуществлялось на металлгидридных ловушках BS1 и BS3 (см. рис. 3), соответственно. Металлгидридная ловушка BS2, дублировала ловушку BS3 и использовалась в случае «отравления» последней. Ловушка BS4 использовалась для улавливания тритийсодержащих газов перед их выбросом в атмосферу при вакуумировании газовых коммуникаций.

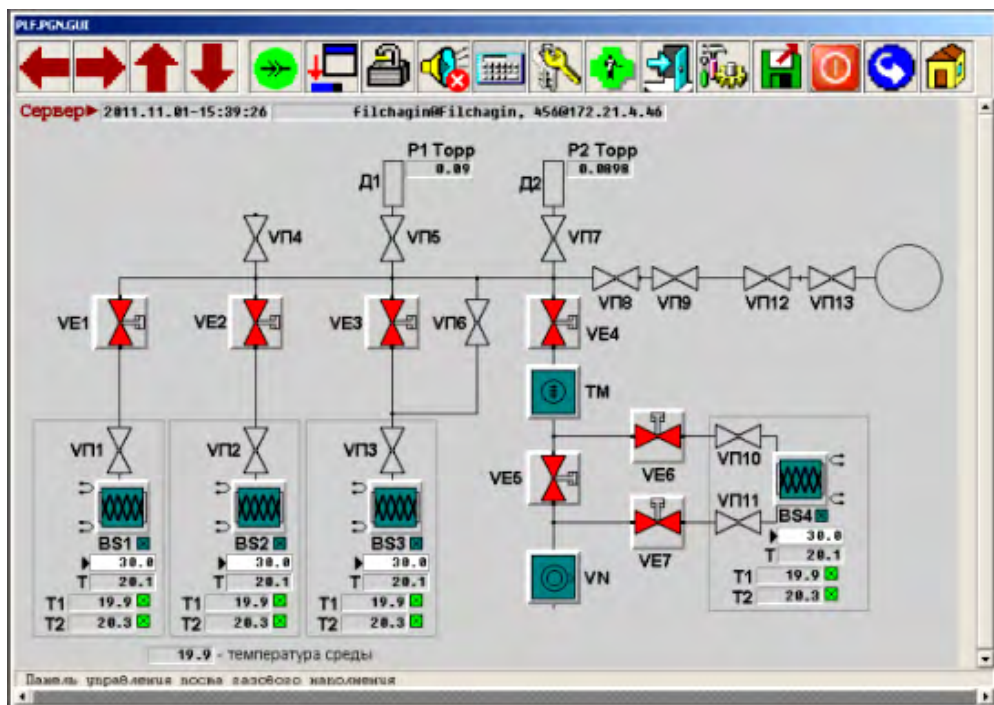


Рис. 3. Схема системы газового наполнения

Материалы в тритийсодержащих средах

Работы по данному направлению проводятся во многих научно-исследовательских организациях РФ (ВНИИЭФ, ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, ВНИИА им. Н. Л. Духова, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ»), ИФХ РАН, СПбГУ, СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича и ряд других), при этом работы, связанные с насыщением материалов радиогенным гелием-3 методом «тритиевого трюка» проводятся в первых двух организациях (ВНИИЭФ и ВНИИНМ им. А. А. Бочвара).

Во ВНИИЭФ совместно с СПбГУ и ИФХ РАН проведен большой комплекс работ, направленных на изучение влияния изотопов водорода (ИВ) и их совместного с ^3He влияния на свойства Ni [42], нержавеющей стали 12X18H10T [43], жаропрочных никелевых сплавов аустенитного класса CrNi40MoCuTiAl [44] и CrNi35WTiAl [45]. Результаты этих работ можно суммировать следующим образом:

- созданы оборудование и методики наработки радиогенного гелия методом «тритиевого трюка» в матрице КМ и проведения исследований с такими образцами [6, 7]. Для наработки больших концентраций ^3He (500 атм и более) в решетке материалов аустенитного класса образцы выдерживались при давлении трития 50 МПа и температуре 800 К, затем быстро охлаждались и хранились до наработки заданного количества ^3He . Такая методика позволя-

ет получать высокие скорости наработки ^3He , например, для нержавеющей стали 12X18H10T скорость наработки составила $\sim 160 \text{ аррм/год}$;

– для серии КМ в широком диапазоне температур проведены исследования влияния радиогенного гелия и его совместного с изотопами водорода влияния на свойства КМ, определены допустимые концентрации радиогенного гелия; обнаружено новое энергетическое состояние захвата водорода, связанное с наличием в матрице КМ радиогенного гелия;

– предложены технологические приемы восстановления служебных свойств КМ, длительно работающих в тритийсодержащих средах.

Однако данная методика оказалась непригодной для материалов с ОЦК решеткой [46]. В связи с высокими диффузионными характеристиками этих материалов основная часть трития уходит из образцов на этапе их охлаждения. За счет этого ^3He распределяется по образцу очень неравномерно, а скорость его наработки, например для образцов $\varnothing 3 \text{ мм}$ из EUROFER 97, не превышает $0,21 \text{ аррм/год}$, что явно недостаточно для наработки больших количеств ^3He . Авторы [46] предложили перед насыщением образцов тритием наносить на них защитные покрытия, например из нитрида титана. При этом процесс насыщения образцов увеличится от 1 до 12 часов, зато перераспределение ^3He по образцу станет более равномерным, а скорость его наработки увеличится до $\sim 22 \text{ аррм/год}$, что составляет $\sim 85 \%$ от максимально возможной. Работы по этому направлению продолжаютсся во ВНИИЭФ.

Сотрудниками ВНИИА им. Н. Л. Духова и ВНИИЭФ проведен комплекс работ по обоснованию применимости безпористой алюмооксидной керамики для устройств, которые длительное время работают с газообразным тритием при повышенных температурах [47]. Этот материал также используется в конструкциях урановых ловушек [47–49], что позволяет более чем в 100 раз снизить диффузионные утечки трития из оборудования, а при применении индукционного нагрева значительно сократить время нахождения ловушки в нагретом состоянии, что существенно повышает безопасность проведения работ.

Малоактивируемые ферритно-мартенситные (RAFM) стали предлагаются в качестве конструкционных материалов для будущих термоядерных реакторов с высокими потоками нейтронов таких как DEMO и ТИН [35]. Для этих целей во ВНИИНМ им. А. А. Бочвара разработан материал ЭК-181 [50]. Исследованиями свойств этого и других RAFM материалов [51, 52], а также таких перспективных материалов как вольфрам [53], ванадиевые сплавы [54] занимается группа к.ф.-м.н. А. В. Спицына из НИЦ «Курчатовский институт». Часть этих работ [51–53] проводится в тесной коллаборации с сотрудниками ВНИИНМ, группой проф. Natano из университета г. Тояма (University of Toyama), Япония и институтом Макс-Планка (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik), Германия. Из значимых результатов, полученных в последнее время можно отметить: исследование проникновения изотопов водорода через стали RUSFER-EK-181 и ChS-68 [55], а также сплав V-4Cr-4Ti [51], исследование захвата изотопов водорода в этих сталях [51, 52] и влияние гелиевой примеси в плазме и быстрых частиц на захват изотопов водорода в вольфраме [53].

В настоящее время этой группой проводятся исследования свойств КМ и функциональных материалов термоядерных установок, содержащих радио-генный ^3He . Для наработки ^3He в КМ методом «тритиевого трюка» во ВНИИНМ им. А. А. Бочвара создана установка, позволяющая проводить насыщение образцов КМ тритием при давлении 2 МПа и температуре 400 °С. При давлении ~1 МПа и температурах 250 °С и 400 °С в течение 24 и 48 часов, соответственно, проведено насыщение аустенитной стали ЧС-68, бронзы Cu-Cr-Zr и вольфрама [56].

В РФ по данному направлению 1 раз в 3 года проводится Международная конференция «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» и ежегодно Школа им. А. А. Курдюмова для молодых ученых и специалистов с одноименным названием /<https://ihism.org/>.

Создание технологического оборудования для работы с тритием и его соединениями

Для решения экологической задачи защиты окружающей среды от выбросов трития в РХТУ им. Д. И. Менделеева разработана новая технология детритизации технологических и сбросных газовых потоков на основе использования процесса фазового изотопного обмена (ФИО) воды. Разработанная технология заложена в проект системы тритиевой безопасности международного проекта экспериментального термоядерного реактора ИТЭР вместо ранее планируемой системы адсорбционной технологии с молекулярными ситами [57].

Для контроля за содержанием трития в газовых средах в виде паров воды и молекулярного водорода в РХТУ им. Д. И. Менделеева разработан новый прибор для отбора проб, основанный на принципе ФИО воды [58]. Несомненным преимуществом этого прибора над серийно выпускаемыми на основе барботеров (Overhoff TASC-НТО-НГ-С14, Marc 7000 и др.) является высокая скорость подготовки жидкой пробы не зависимо от уровня концентрации трития в газовой атмосфере. Прибор обеспечивает предел обнаружения трития на уровне 40 Бк/м³ при времени подготовки жидкой пробы на пределе обнаружения 60–90 мин. Степень извлечения трития из газового потока, при этом, составляет величину не менее 99,95 %.

Более подробно обзор работ по исследованиям в области создания тритиевых технологий очистки водяных и газовых потоков с низким содержанием трития и создания методов разделения смесей изотопов водорода, содержащих высокие концентрации трития, выполненных РХТУ им. Д. И. Менделеева в последнее время, представлен в [59].

В ПИЯФ (г. Гатчина, Ленинградской обл.) в тесном сотрудничестве с ЗАО «ДОЛ» и РХТУ им. Д. И. Менделеева создана установка ЭВИО на которой в течение уже более 20 лет проводятся работы по отработке технологии СЕСЕ [60, 61]. В этих исследованиях продемонстрирована высокая эффективность и стабильность работы колонн изотопного обмена. Благодаря высокому качеству российского гидрофобного катализатора РХТУ-ЗСМ и отработанным

приемам работы с ним, катализатор сохраняет свою каталитическую активность в течение многих (более 20) лет. Показана возможность достижения высоких степеней очистки тяжелой воды от трития (на три порядка и более) в сравнительно невысоких (высотой ~ 7 м) колоннах, работающих при умеренных температурах (65–75 °С) и давлениях (150–180 кПа). Производительность установки по очищенной от трития тяжелой воде составляет до 300 кг/месяц. Производимые на установке тяжелая вода и дейтерий поставляются как российским предприятиям и организациям, так и экспортируются.

В ПИЯФ разработана установка извлечения трития (УИТ) из тяжелой воды реактора ПИК [62, 63]. Установка рассчитана на поддержание концентрации трития в тяжелой воде реактора на уровне не более $7,4 \cdot 10^{10}$ Бк/кг (2 Ки/кг), при этом из тяжеловодного контура реактора УИТ позволяет извлекать до $1,1 \cdot 10^{16}$ Бк трития (30 000 Ки) в год. Также УИТ способна поддерживать изотопный состав тяжелой воды по дейтерию на уровне не менее 99,8 ат.%, для чего обеспечивается извлечение из тяжеловодного контура реактора до 40 кг в год обычной («легкой») воды. В настоящее время ведется сооружение этой установки [64].

В РФЯЦ-ВНИИЭФ в научных исследованиях широко применяется метод Раман спектроскопии для безотборного анализа состава газовых смесей изотопов водорода, в том числе находящихся при высоких давлениях [65]. Для этой цели разработаны специальные оптоволоконные зонды высокого давления, позволяющие проводить анализ состава смеси изотопов водорода при давлениях до 400 МПа [66].

Создание технологий утилизации тритиевых отходов

В РФЯЦ-ВНИИЭФ проводятся работы связанные с утилизацией тритиевых радиоактивных отходов (РАО) и разработкой соответствующих технологий. В последние годы предложена технология выделения твердых мелкодисперсных нерастворимых радиоактивных компонентов из жидких радиоактивных отходов (ЖРО) [67]. На различной стадии технологической готовности находятся технологии отверждения органических и водных ЖРО [68]. На базе имеющихся разработок предложена и проработана концепция Модульного комплекса по переработке ЖРО на месте их образования.

В РХТУ им. Д. И. Менделеева в рамках разработки методов цементирования низкоактивных тритийсодержащих водных ЖРО предложены методики определения кинетики выщелачивания трития из цементных компаундов при контакте с влажным воздухом и водой. Проводится разработка способов иммобилизации тритийсодержащей воды с использованием портландцемента с водоудерживающими добавками [69]. Показано, что введение в цементный компаунд добавки микрокремнезема позволяет снизить выщелачивания трития более, чем в 10 раз. В рамках работ по отверждению жидких органических тритийсодержащих отходов разрабатываются методы отверждения тритийсо-

держащих вакуумных масел и органических растворителей с использованием цементных и битумных композитов с терморасширенным графитом [70, 71]. Работы находятся на стадии лабораторных исследований.

Изучение влияния трития на окружающую среду и биосферу

Специалистами ВНИИЭФ и ЗАО «Саровские лаборатории» проведен большой цикл работ, связанных с моделированием поведения трития и его соединений в окружающей среде в непосредственной близости от источника его выделения [72]. Авторами проведены исследования радиолиза под действием излучения трития, дисперсии трития в атмосфере над подстилающей поверхностью со сложным рельефом, окисления *HT* в почве почвенными бактериями, вымывания *НТО* из атмосферы и миграции в ненасыщенном слое почвы, а также усвоение *НТО* сельскохозяйственными растениями и лишайниками. Разработаны модели поведения трития, которые прошли верификацию и валидацию. Эти результаты дают понимание ожидаемых экологических последствий при долгосрочной эксплуатации источника выделения трития в окружающую среду.

В ФМБЦ им. А. И. Бурназяна (г. Москва) разрабатывается методология учета биологической опасности трития и его соединений с переходом от оценки соматических нарушений в органах и системах организма к исследованию формирования цитогенетических нарушений, с поиском высокоинформативных и специфичных критериев оценки возникающих трансляционных и пост трансляционных нарушений [73, 74].

С целью совершенствования нормативной базы по радиационной безопасности персонала и населения и пересмотра принципов дозиметрии трития, для подготовки новой редакции Норм радиационной безопасности, осуществляется оценка поступления соединений трития (*НТО* и органически-связанного трития (*ОСТ*)) в клетку и их распределение в цитоплазме клетки, ядре и ДНК. Этими исследованиями показано, что особенность размещения *ОСТ* в клетке, связанная с его локальным распределением является определяющим при формировании нарушений и требует пересмотра оценки биологической опасности трития [75].

Для формирования дозы от поступающего в организм трития разрабатываются соответствующие методики, позволяющие проводить оценки вклада в зависимости от формы трития (газ, оксид или *ОСТ*). Полученные данные по распространению трития в технологических системах позволили разработать принципы математического моделирования его распределения. Это, в свою очередь, позволяет осуществлять проектирование новых энергетических установок и оценивать формирование возможной дозы у персонала и населения в зависимости от принимаемых проектных решений [76].

МАГАТЭ рассматривает тритий как один из наиболее важных факторов воздействия на окружающую среду при выработке электроэнергии [77]. В штатных условиях поступление трития в атмосферу происходит как от источников с организованным выбросом (трубы вентиляционной системы), так и от источников с неогранизованным выбросом, таких как брызгальные бассейны [78] и технологические водоемы [79]. Для АЭС с различными типами реакторных установок тритий входит в число основных дозообразующих радионуклидов, определяющих не менее 99 % дозы облучения критической группы населения от выбросов АЭС в России и в мире [80]. По данным, полученным сотрудниками ИПЭ УроРАН, в России эксплуатируются АЭС с минимальными удельными показателями выброса трития на единицу произведенной электрической энергии [81].

Светоэлементы на основе трития

ПО «Маяк» серийно производит радиолюминесцентные светоэлементы (РЛС) и изделия на их основе [82]. Конструктивно РЛС представляет собой герметично запаянный стеклянный цилиндр, на внутренней поверхности которого с помощью связующего зафиксирован радиолюминофор. Объем цилиндра заполнен газовой смесью, содержащей тритий. Под действием β -излучения трития происходит активация и свечение люминофора, представляющего собой ZnS, легированный медью. С целью расширения ассортимента светотехнической продукции, рассматривается возможность выпуска изделий разного цвета свечения, что обуславливает необходимость использования новых типов люминофоров различной химической природы и новых клеящих составов.

Исследована возможность использования 1,3-дикетонатных производных редкоземельных элементов в качестве радиолюминофоров, люминесцирующих под действием бета-частиц трития. Синтезированные материалы испытаны в серийном производстве РЛС, подтверждено наличие свечения тестируемых порошков люминофоров в среде трития. Исследована возможность формирования люминофорных покрытий на основе кремнийорганического связующего применительно к технологии производства РЛС.

Я благодарен всем своим коллегам из РФЯЦ-ВНИИЭФ, принявшим участие в подготовке и обсуждении материала (И. П. Максимкину, И. Л. Малкову, Р. К. Мусяеву, В. В. Тихонову, В. А. Королеву, П. В. Ширнину), а также сотрудникам РХТУ им. Д. И. Менделеева (Э. П. Магомедбекову, М. Б. Розенкевичу, И. Л. Растуновой, Ю. С. Паку), сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» (А. В. Спицину, С. С. Ананьеву и М. П. Файфману), сотрудникам ПО «Маяк» (С. М-А. Валееву, С. В. Светлакову и Т. С. Волковой), И. А. Алексееву из ПИЯФ, А. И. Лившицу из СПбГУТ, А. С. Фомичеву из ОИЯИ, А. А. Семёнову из ВНИИНМ им. Бочвара, В. Г. Барчукову из ФМБЦ им А. И. Бурназяна.

Список литературы

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Тритий>. Дата обращения: 01.04.2019.
2. Кузнецов В. М., Назаров А. Г. Радиационное наследие холодной войны // М.: Ключ-С, 2006. С. 470–529.
3. Новоселов В. Н., Носач Ю. Ф., Ентяков Б. Н. Атомное сердце России. Челябинск: Автограф, 2014.
4. <https://www.po-mayak.ru>. Дата обращения: 01.04.2019.
5. Yukhimchuk A. A. Tritium activities in Russia // Fusion Science and Technology, 2002, vol. 41, p. 334–338.
6. Yukhimchuk A. A., Il'kaev R. I. Status of efforts on fundamental and applied studies with application of tritium at RFNC-VNIIEF // Fusion Science and Technology, 2015, vol. 67, p. 666–670.
7. Yukhimchuk A. A. et al. Facility for preparation of gas mixture in muon catalyzed fusion experiments // Hyperfine Interactions, 1999, vol. 119, N 1–4, p. 341–344.
8. Perevozchikov V. V. et al. A high-pressure tritium target // Instruments and Experimental Techniques, 1999, vol. 42, N 1, p. 25–30.
9. Perevozchikov V. V. et al. High-pressure tritium targets for research in muon-catalyzed fusion // Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48, p. 310–313.
10. Yukhimchuk A. A. et al. Cryogenic tritium target // Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48, p. 294–297.
11. Bom V. R. et al. Temperature and density dependence of μ -catalysis cycling rate in dense D/T and H/D/T gas mixtures // Hyperfine Interaction, 1999, vol. 118, N 1–4, p. 103–109.
12. Bom V. R. et al. Measurement of the temperature dependence of the $dd\mu$ -molecule formation rate in dense deuterium at 300–800 K // Hyperfine Interactions, 2001, vol. 138, p. 313–319.
13. Bogdanova L. N. et al. Experimental Investigation of Muon-catalyzed $t + t$ Fusion // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2009, vol. 108, N 2, p. 216–225.
14. Anisimov V. V. et al. A 14 MeV intense neutron source based on muon-catalyzed fusion; I-An advanced design, II – Pion producing target, III – Thermohydraulic regime of synthesizer // Fusion Technology, 2001, vol. 39, p. 198–227.
15. Yukhimchuk A. A., Arkhangel'sky V. A. Tritium fuel cycle for Muon-Catalyzed intense neutron source (MC INS) // Hyperfine interactions, 2001, vol. 138, p. 409–415 // Fusion Science and Technology, 2002, vol. 41, p. 826–830.
16. Baluev V. V. et al. Experimental search for the radiative capture reaction from muonic molecule state $J = 1$ // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2011, vol. 113, N 1, p. 68–74.

17. Sabourov K. et al. Experimental and theoretical study of the ${}^2\text{H}(d, \gamma){}^4\text{He}$ reaction below $E_{c/m} = 60$ keV // *Phys. Rev. C: Nucl. Phys.*, 2004, vol. 70, 064601.
18. Юхимчук А. А. и др. Жидкотритиевая мишень для исследования реакций ртμ-синтеза // ПТЭ, 2019, № 4, с. 12–20.
19. Demin D. L. et al. Experimental search of nuclear fusion reactions in a ртμ system // International Conference «New Trends in High-Energy Physics», 24–30 September 2018, Budva, Montenegro.
20. Зельдович Я. Б., Герштейн С. С. Ядерные реакции в холодном водороде // *Успехи физических наук*, 1960, Т. LXXI, № 4, с. 581–630.
21. Vinogradov Yu. I., Kuryakin A. V., Yukhimchuk A. A. Measurement and control systems of tritium facilities for scientific research // *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 48, N 1, p. 696–699.
22. Yukhimchuk A. A. et al. Gas feeding system supplying the U-400M cyclotron ion source with hydrogen isotopes // *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 48, N 1, p. 704–707.
23. Yukhimchuk A. A. et al. Tritium target for research in exotic neutron-excess nuclei // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2003, Section A, vol. 513, N 3, 439–447.
24. Григоренко Л. В. и др. Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. УФН, 2016, т. 186, № 4, с. 337–386 // L. V. Grigorenko et al. Studies of light exotic nuclei in vicinity of neutron and proton drip-lines at FLNR JINR. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2016, т. 186, № 4, с. 337–386.
25. Fomichev A. S. et al. The ACCULINNA-2 project: The physics case and technical challenges // *EPL*, 2018, A, 54:97.
26. Trofimov V. N., Neganov B. S., Yukhimchuk A. A. Measurement of the Neutrino Magnetic Moment at a Level Better than $10^{-11} \mu_B$ with a Tritium ν Emitter and Cryodetector // *Physics of Atomic Nuclei*, 1998, т. 61, № 8, p. 1271–1273.
27. Yukhimchuk A. A. et al. Status of works on a 40-MCi - activity tritium source for the measurement of the antineutrino magnetic moment // *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 48, N 1, p. 731–736.
28. Neganov B. S. et al. Status of the experiments on the laboratory search for the electron antineutrino magnetic moment at the level $\mu_\nu \leq 3 \cdot 10^{-12} \mu_B$ // *Physics of Atomic Nuclei*, 2001, Vol. 64, N 11, p. 1948–1954.
29. Starostin A. S., Beda A. G. Germanium detector with an internal amplification for investigation rare processes // *Physics of Atomic Nuclei*, 2000, vol. 63, N 7, p. 1297–1300.

30. Martemyanov V. P., Tsinoev V. G. Ionization of helium atoms under the effect of the antineutrino magnetic moment // *Physics of Atomic Nuclei*, 2011, vol. 74, N 12, p. 1671–1675.
31. Martemyanov V. P. et al. Probing of the neutrino magnetic moment at the level of $10^{-12} \mu_B$ with an intense tritium source of (anti)neutrino and helium target (project) // *Fusion Science and Technology*, 2015, vol. 67, p. 535–538.
32. Coppi B. et al. Perspective for the high field approach in fusion research and advances within the Ignitor Program // *Nuclear Fusion*, 2015, vol. 55, 053011.
33. Subbotin M. L., Gostev A. A., Khripunov V. I. Некоторые особенности размещения токамака Игнитор на площадке АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». Some feasibilities of the Ignitor location within the TRINITI site. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2018, т. 41, вып. 3.
34. Перевезенцев А. Н., Розенкевич М. Б., Субботин М. Л. Концепция топливного цикла токамака ИГНИТОР // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2018, т. 41, вып. 1.
35. Kuteev B. V. et al. Status of DEMO-FNS development // *Nuclear Fusion*, 2017, vol. 57, 076039.
36. Ananyev S. S., Spitsyn A. V., Kuteev B. V. Concept of DT fuel cycle for a fusion neutron source DEMO-FNS // *Fusion Engineering and Design*, 2016, p. 57–60.
37. Belkov S. A., Garanin S. G., Shagalkin Yu. V. «Laser Facility Development and Principle results during recent 5 years», Report on International Conference ECLIM XXIV, Moscow, September 18–23, 2016.
38. Yukhimchuk A. A. et al. «PROMETHEUS» setup for study of tritium superpermeation // *Fusion Science and Technology*, 2002, vol. 41, N 3, p. 929–933.
39. Musyaev R. K. et al. Tritium superpermeability: experimental investigation and simulation of tritium recirculation in «PROMETHEUS» setup // *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 48, N 1, p. 35–38.
40. Musyaev R. K. et al. Study of hydrogen isotopes superpermeation through vanadium membrane on «PROMETHEUS» setup // *Fusion Science and Technology*, 2008, vol. 54, N 2, p. 523–525.
41. Завьялов Н. В. и др. Источник с выходом 10^{13} ДТ-нейтронов на основе сферической камеры с плазменным фокусом // *Физика плазмы*, 2013, Т. 39, № 3, с. 276.
42. Kompaniets T. et al. Hydrogen Interaction with Nickel Containing Radiogenic Helium // *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 60, N 4, p. 1552–1555.
43. Yukhimchuk A. et al. Hydrogen Interaction with Stainless Steel Containing Radiogenic ^3He // *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 60, N 4, p. 1556–1559.

44. Maksimkin I. et al. Radiogenic ^3He and Hydrogen Impact of Mechanical Properties and Structure of CrNi40MoCuTiAl Alloy // Fusion Science and Technology, 2011, vol. 60, N 4, 1519–1522.
45. Maksimkin I. et al. Mechanical Properties and Permeability of Hydrogen Isotopes through CrNi35WTiAl Alloy Containing Radiogenic Helium // Fusion Science and Technology, 2015, vol. 67, N 2, p. 459–462.
46. Малков И. Л., Попов В. В. Применение «третиевого трюка» для наработки гелия-3 в сталях с ОЦК решеткой. Сб. докладов IHISM'15 Junior. Саров: 2016, с. 142–164.
47. Yukhimchuk A. A. et al. Application of Nonporous Alumina Based Ceramics as Structural Material for Devices Handling Tritium at Elevated Temperatures // Fusion Science and Technology, 2015, vol. 67, N 3, p. 662–665.
48. Khapov A. S., Grishechkin S. K., Kiselev V. G. A uranium bed with ceramic body for tritium storage // Fusion Science and Technology, 2015, vol. 67, N 3, p. 412–415.
49. Патент РФ № 2556110 С2. Способ хранения и выделения изотопов водорода и устройство для его осуществления. Юхимчук А.А. и др. Бюлл. № 19, 2015.
50. Chernov V. M. et al. Structural materials for fusion power reactor – the RF R&D activities // Nuclear Fusion, 2007, vol. 47, N 8, p. 839–848.
51. Hatano Y. et al. Tritium retention in reduced-activation ferritic / martensitic steel // Fusion Science and Technology, 2015, vol. 67, p. 361–364.
52. Spitsyn A. V. et al. Retention of deuterium in damaged low-activation steel Rusfer (EK-181) after gas and plasma exposure // Journal of Nuclear Materials, 2014, vol. 455, p. 561–567.
53. Bobyr N. P. et al. Influence of helium on hydrogen isotope exchange in tungsten at sequential exposures to deuterium and helium-protium plasmas // Journal of Nuclear Materials, 2015, vol. 463, p. 1122–1124.
54. Черкез Д. И. и др. Проникновение через низкоактивируемый сплав V-4Cr-4Ti и сплав V-4Cr-4Ti с нанесенными AlN/Al – покрытиями // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез, 2018, т. 41, № 2, с. 41–58.
55. Golubeva A. V. et al. Hydrogen interaction with the low activation ferritic-martensitic steel EK-181 (Rusfer) // Journal of Nuclear Materials, 2013, vol. 438, p. 983–987.
56. Bobyr N. et al. Detritiation of tungsten after tritium gas exposure // 12th International Conference on Tritium Science and Technology. www.tritium2019.org, April 22–26, 2019, p. 119.
57. Rozenkevich M. et al. Main Features of the Technology for Air Detritiation in Scrubber Column // Fusion Science and Technology, 2016, vol. 70, N 3, p. 435–447.

58. Букин А. Н. и др. Способ отбора проб тритированной воды методом фазового изотопного обмена // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2017, т. 83, № 7, с. 27–31.
59. Mikhail B. Rozenkevich et al. Physico-Chemical methods of handling tritiated water and gas streams // 12th International Conference on Tritium Science and Technology. www.tritium2019.org, April 22–26, 2019, p. 232.
60. Alekseev I. A. et al. Fifteen years of operation of CECE experimental industrial plant in PNPI // Fusion Science and Technology, 2011, vol. 60, p. 1117.
61. Fedorchenko O. A. et al. Experimental results and experience with LPCE process. 12th International Conference on Tritium Science and Technology. www.tritium2019.org, April 22–26, 2019, p. 183.
62. Bondarenko S. D. et al. Conception of Multi-Purpose Heavy Water Detritiation Plant // Fusion Science and Technology, 2017, vol. 71, N 5, p. 605.
63. Патент РФ № 174134. Установка для очистки тяжелой воды от трития и протия. Алексеев И. А., Бондаренко С. Д., Васянина Т. В., Федорченко О. А. Бюлл. № 28, 2017.
64. Alekseev I. A. et al. The current status of the heavy water detritiation facility at PNPI. 12th International Conference on Tritium Science and Technology. www.tritium2019.org, April 22–26, 2019, p. 213.
65. Tikhonov V. V. et al. Investigation of hydrogen isotope exchange reaction rate in mixed gas (H_2 and D_2) at pressure up to 200 MPa using Raman spectroscopy // Fusion Science and Technology, 2015, vol. 67, p. 612–614.
66. Патент РФ № 140222. Оптический зонд. Тихонов В. В., Юхимчук А. А., Балувев В. В. Бюлл. № 13, 2014.
67. Kazakovsky N., Korolev V., Yukhimchuk A. New Technologies for Conditioning Liquid Radioactive Wastes // 12th International Conference on Tritium Science and Tecnology. www.tritium2019.org, April 22–26, 2019, p. 118.
68. Kazakovsky N. T., Korolev V. A. Specifics of oil vacuum pumps operation in handling radioactive materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 25, 2018, p. 012031.
69. Растунова И. Л., Защелкина Л. И. Оценка возможности использования матриц портландцемента для отверждения низкоактивных тритийсодержащих водных отходов // Огнеупоры и техническая керамика, 2013, № 1–2, с. 3–7.
70. Sazonov A. B., Aleshina A. V., Magomedbekov E. P. Immobilization of Tritium-Containing Oil Wastes by Their Incorporation in a Cement Matrix // Radiochemistry, 2009, vol. 51, N 4, p. 412–414.
71. Sazonov A. B., Aung Djo Thun, Magomedbekov E. P., Ponomarev A. V., Tananaev I. G., Myasoedov B. F. Carbon Sorbents for Immobilization of Tritium-containing Waste Oils // Russian Journal of General Chemistry, 2011, vol. 81, N 9, p. 1999–2006.

72. Alexey Golubev and Valentina Golubeva. Expected environmental effects at long-term tritium supply-lessons learned // 12th International Conference on Tritium Science and Technology. www.tritium2019.org, April 22–26, 2019, p. 315.
73. Воробьева Н. Ю. и др. Сравнительные исследования образования фокусов γ H2AX в мезенхимных стволовых клетках человека при воздействии Н-тимидина, оксида трития и рентгеновского излучения // Клеточные технологии в биологии и медицине, 2018, № 3, с. 205–208 // Vorobeva N. Y. et al. Comparative analysis of the formation of γ H2AX foci in human mesenchymal stem cells exposed to (3)H-thymidine, tritium oxide, and x-rays irradiation // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 2018, vol. 166, N 1, p. 178–181.
74. Воробьева Н. Ю. и др. Влияние 3 H-тимидина на индукцию двунигетевых разрывов ДНК в мезенхимальных стволовых клетках человека // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2018, т. 63, № 1, с. 28–34.
75. Барчуков В. Г. и др. Нормативно-методическое обеспечение контроля содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды (современное состояние проблемы) // АНРИ, 2018, № 3, с. 8–16.
76. Барчуков В. Г. и др. Распространение трития и его соединений воздушным путем при нормальных условиях эксплуатации Балаковской АЭС // АНРИ, 2016, № 1, с. 49–54.
77. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3. 107 p.
78. Екидин А. А. и др. Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в холодный период // Ядерная и радиационная безопасность, 2017, № 3 (85), с. 35–46.
79. Екидин А. А., Антонов К. Л., Жуковский М. В. Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоемов // Вопросы радиационной безопасности, 2012, № 3 (67), с. 3–10.
80. Ekinin A. A. et al. Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions // Atomic Energy, 2016, vol. 120, N 2, p. 134–137.
81. Десятов Д. Д., Екидин А. А. Оценка поступления трития в окружающую среду от выбросов АЭС // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2018, № 1 (21), с. 88–96.
82. Волкова Т. С., Ивашкевич Н. А., Рудских В. В. Исследование возможности использования нового состава связующего применительно к технологии изготовления газовых радиолуминисцентных светоэлементов // Сб. докладов 13 Международной Школы IHISM'19 Junior. Саров 2020, с. 180.

Tritium – related activities in the RF

A. A. Yukhimchuk

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Experimental Physic (RFNC-VNIIEF),
Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia
arkad@triton.vniief.ru

An overview of tritium-related efforts completed in the RF by various scientific institutions since 2001 up to date is presented. The scope of efforts covers almost all fields of tritium and its compounds management: tritium production, application of a tritium for basic and applied research, controlled fusion research, research of physical/chemical and mechanical properties of the materials operating in tritium containing media, development of technologies for tritium handling, development of technologies for tritium waste management, study of tritium impact on the environment and biosphere, development technologies of tritium-based illuminating elements.