

РАБОТЫ ПО ВОДОРОДНОЙ ТЕМАТИКЕ В РФЯЦ-ВНИИЭФ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. А. Юхимчук, Р. И. Илькаев

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская область, Россия
arkad@triton.vniief.ru

Приведен обзор работ, выполненных с участием РФЯЦ-ВНИИЭФ по водородной тематике в период с 2010г. Приводятся новые физические результаты в области исследований мюонного катализа и нейтронно-избыточных ядер, обсуждается проект нового эксперимента по поиску магнитного момента нейтрино с использованием тритиевого источника и гелиевого детектора. Приведены результаты работ по созданию источника нейтронов типа плазменного фокуса с интенсивностью 10^{13} с^{-1} , новые экспериментальные данные по динамической сжимаемости и электрофизическим свойствам дейтерия и гелия в экстремальных состояниях при давлениях до 5000 ГПа. Представлен краткий обзор результатов исследований в области взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами, применению алюмооксидной керамики для устройств хранения и генерации трития, созданию технологии и оборудования компактного гидрирования титана, а также новых методов и методик, обеспечивающих проведение работ с изотопами водорода.

Введение

Обзор работ, выполняемых с участием ВНИИЭФ по водородной тематике, последний раз докладывался авторами на 4 Международной конференции и 6 Международной Школе молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'10», которые проводились с 5 по 10 июля 2010 г. в г. Воронеже /1/. В настоящем докладе по этому направлению представлен обзор завершенных за этот период работ, приведено текущее состояние дел и представлены планы наших будущих исследований. Особое внимание в докладе будет уделено следующим работам:

В области фундаментальной науки

В Лаборатории Ядерных Проблем им. Дзелепова Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) (г. Дубна) на комплексе ТРИТОН завершены работы по исследованию реакции радиоактивного захвата $d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ из состояния $J = 1$ мюонной молекулы $dd\mu$ /2/. Экспериментально получено, что вероятность протекания данной реакции составляет $\eta_\gamma \leq 8 \cdot 10^{-7}$ на акт синтеза. Продолжаются работы по использованию явления мюонного катализа для определения вероятности протекания реакции

$p\tau\tau \rightarrow {}^4\text{He} + e^+e^- + 18,79 \text{ МэВ}$ /3/. Это явление исследовалось ранее в единственном эксперименте, и находится сейчас в центре внимания ядерной физики многих тел – снятие возбуждения ядра в электромагнитном процессе.

В Лаборатории Ядерных Реакций им. Флерова ОИЯИ (г. Дубна) на сепараторе АКУЛИНА с использованием системы тритиевого обеспечения и семейства тритиевых мишеней была проведена серия экспериментов. Получены спектры нижних состояний ядер ${}^8\text{He}$ и ${}^{10}\text{He}$, заселённых в реакциях передачи ${}^6\text{He}(t, {}^8\text{He})p$ и ${}^8\text{He}(t, {}^{10}\text{He})p$ /4/. Впервые установлены структура и свойства основного резонансного состояния ядра ${}^{10}\text{He}$: определена его энергия ${}^8\text{He} + n + n$ распада, равная $2,1 \pm 0,2 \text{ МэВ}$, определена его форма и найдена ширина $\Gamma \approx 2 \text{ МэВ}$. Обнаружена околопороговая аномалия спектра ${}^8\text{He}$, которая была объяснена мягкой дипольной модой возбуждения, присущей ядру ${}^8\text{He}$, имеющему 4-х нейтронное гало /5/. В ближайшем будущем планируется в экспериментальной зоне строящегося сепаратора АКУЛИНА-2 создать новую систему подачи и утилизации трития, а также разработать новые мишени для исследования структуры нейтронно-избыточных ядер /6/.

Во ВНИИЭФ:

- в сферическом устройстве с плазменным фокусом, заполненном равнокомпонентной смесью DT, при максимальной амплитуде тока в газоразрядной камере $\sim 1,5 \text{ МА}$ зарегистрированы импульсы нейтронного излучения длительностью на полувысоте 75–80 нс и интегральным выходом DT нейтронов $\sim 1,3 \cdot 10^{13}$ /7/. Работы продолжаются в направлении создания мобильного источника нейтронов;

- разрабатывается интенсивный искусственный источник (анти)нейтрино активностью до 40 МКи для эксперимента по поиску магнитного момента нейтрино на уровне 10^{-12} магнетона Бора с детектором использующим эффект рассеяния нейтрино на электронах атомов жидкого гелия /8/;

- получены новые экспериментальные данные по динамической сжимаемости и электрофизическим свойствам дейтерия и гелия в экстремальных состояниях при давлениях до 5000 ГПа /9, 10/.

В области прикладных исследований

Будет представлен краткий обзор основных результатов завершённых работ в области исследований взаимодействия изотопов водорода (ИВ) с конструкционными материалами (КМ), содержащими радиогенный ${}^3\text{He}$.

Кратко будут представлены результаты исследований применимости алюмокерамики в качестве КМ устройств содержащих тритий при высоких температурах и состояние работ по созданию конструкций с их использованием.

В 2013–2014 годах ВНИИЭФ разработал технологию компактного гидрирования дроби титана, которая используется для биологической защиты ядерных энергетических установок /11/. На основе этой технологии планируется создание оборудования для получения гидрированной дроби титана.

Одним из перспективных методов анализа состава газовых смесей, содержащих изотопы водорода, является метод комбинационного рассеяния света (КРС), который позволяет осуществлять безотборный контроль состава газовых смесей в экспериментальных и технологических производственных процессах. Во ВНИИЭФ разработано оборудование, позволяющее проводить

такой анализ при давлениях ИВ до 400 МПа /12/. Данный метод особенно перспективен и в будущем должен найти свое широкое применение при работах со смесями ИВ, содержащими тритий.

1. МЮОННЫЙ КАТАЛИЗ

Для исследований процессов мюонного катализа в различных смесях ИВ коллаборацией РФЯЦ-ВНИИЭФ и Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) г. Дубна в 1995/96 г.г. был создан комплекс ТРИТОН, позволяющий проводить работы с тритием активностью до 10 кКи в условиях открытых лабораторий /13/. За десятилетие на этом комплексе проведены систематические исследования явления мюонного катализа в широком диапазоне варьируемых параметров /14/. Эти исследования показали невозможность создания энергетического реактора на основе мюонного катализа. Однако, достигнутый прогресс в теоретических и экспериментальных исследованиях явления мюонного катализа позволяет использовать это явление для изучения многочастичных взаимодействий.

В 2014–2015 гг. планируется эксперимент по исследованию реакции $p\bar{\mu} \rightarrow {}^4\text{He}\mu + e^+e^- + 18,79 \text{ МэВ} /3/$.

Для этой цели во ВНИИЭФ разработана жидкотритиевая мишень объемом 50 см³ (рис. 1). На комплексе ТРИТОН /13/ с использованием данной мишени в ЛЯП ОИЯИ будут проведены эксперименты с против – тритиевой смесью (0,5 и 1 % трития).

К сожалению работы по этому направлению сворачиваются и в 2016–2017 гг. планируется утилизация комплекса ТРИТОН.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ЯДЕР

Создание уникального оборудования для работы с тритием в условиях неспециализированных ЛАБОРАТОРИЙ /15, 16/ позволившее получить на циклотроне У-400М ЛЯР ОИЯИ единственный в мире (в настоящее время) пучок ядер трития, а также применение радиационно-безопасных тритиевых мишеней обеспечили создание уникальных возможностей для исследования структуры атомных ядер, находящихся на границе стабильности по отношению к самопроизвольному испусканию нейтрона.

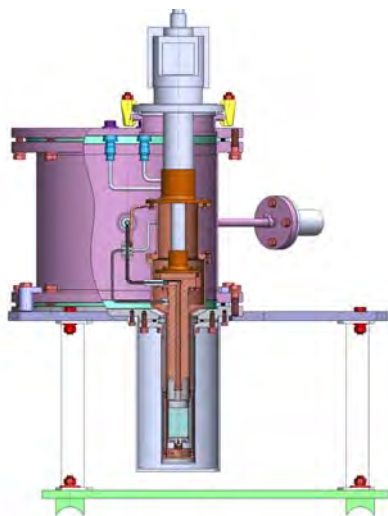


Рис. 1. Жидкотритиевая мишень

В цикле экспериментов, проведенных на этом комплексе оборудования, были впервые изучены спектры состояний ультра нейтронно-избыточных ядер водорода и гелия с массовыми числами 4–5 /16–19/ и 8–10 /4, 5, 20, 21/, соответственно, и определены свойства этих ядер, имеющие большое значение для развития теории малонуклонных ядерных систем. Были впервые надежно установлены свойства основных и возбужденных состояний ряда ядер, ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$, ${}^9\text{He}$, ${}^{10}\text{He}$, находящихся за пределами нейтронной стабильности, и были получены новые существенные данные, определяющие структуру возбужденных состояний ядра ${}^8\text{He}$, имеющего в структуре, по современным представлениям, ${}^4\text{He}$ кор- и гало, образованное четырьмя нейтронами.

Получены спектры нижних состояний ядер ${}^8\text{He}$ и ${}^{10}\text{He}$, заселённых в реакциях передачи ${}^6\text{He}(t, {}^8\text{He})p$ и ${}^8\text{He}(t, {}^{10}\text{He})p$, изученных под малыми углами в системе центра масс при энергии пучков ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ ~ 25 МэВ/нуклон /20,21/. Основное 0^+ состояние ${}^8\text{He}$ и его возбужденные состояния 2^+ , при энергии возбуждения $E^* = 3,6\text{--}3,9$ МэВ, и (1^+) $E^* = 5,3\text{--}5,5$ МэВ, были получены с поперечными сечениями 200, 100–250, и 90–125 мкб/ср, соответственно. Обнаруженная околопороговая аномалия спектра ${}^8\text{He}$ была объяснена заселением 1^- состояния, т. е. мягкой дипольной модой возбуждения, присущей ядру ${}^8\text{He}$, имеющему 4-х нейтронное гало.

Впервые установлены структура и свойства основного резонансного состояния ядра ${}^{10}\text{He}$: определена его энергия ${}^8\text{He} + p + n$ распада, равная $2,1 \pm 0,2$ МэВ, определена его форма и найдена ширина $\Gamma \approx 2$ МэВ. В измеренных угловых корреляциях продуктов распада выявлены четкие структуры интерференции трех состояний ядра ${}^{10}\text{He}$: основного состояния, имеющего спин-четность 0^+ , первого возбужденного состояния со спин-четностью 1^- и энергией 4–6 МэВ и второго состояния 2^+ с энергией выше 6 МэВ. Найденный порядок следования уровней ${}^{10}\text{He}$ указывает на резкое ослабление нейтронной оболочки $N = 8$ в этом дважды магическом ядре, главной особенностью которого является исключительно высокая протон-нейтронная асимметрия.

3. ИНТЕНСИВНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ТИПА ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

Исследования физических явлений и процессов генерации нейтронного и рентгеновского излучений в сферических газоразрядных камерах с плазменным фокусом (ПФ) ведутся во ВНИИЭФ с начала 1960-х гг. /22, 23/. При относительно простой конструкции импульсные нейтронные источники (ИНИ) на базе сферических камер с ПФ обладают рядом достоинств по сравнению с другими типами генераторов нейтронов. Они имеют небольшие размеры излучающей области (порядка нескольких миллиметров) и малую длительность импульса, большую плотность потока (до 10^{18} нейтронов/см²·с) и высокую монохроматичность. Такие ИНИ могут применяться для контроля подкритичности реакторных сборок, формирования дефектов в полупроводниках и калибровки детекторов проникающих излучений, в исследованиях в области нейтронной радиографии, для активационного анализа элементного состава веществ и обнаружения делящихся материалов и взрывчатых веществ.

За последние три года во ВНИИЭФ была создана конденсаторная передвижная установка КПУ-200 [7]. Установка представляет собой генератор импульсов тока, в котором происходит накопление электрической энергии, формирование импульса тока и передача его в плазменную нейтронную камеру.

Составные части КПУ-200, кроме пульта управления, расположены в транспортируемом фургоне. Управление установкой, а также регистрация параметров импульса осуществляется с удаленного на расстояние до 100 м пульта управления.

При проведении экспериментов камера с ПФ предварительно откачивалась с помощью поста газового наполнения (ПГН) до остаточного давления (10^{-1} – 10^{-2} Па) и затем наполнялась дейтерием или равнокомпонентной смесью дейтерия с тритием до рабочего давления $(1-3) \cdot 10^3$ Па. Схема ПГН представлена на рис. 2, а общий вид на рис. 3. Функционально ПГН включает в себя системы вакуумной откачки и газового наполнения, блок управления и контроля и пульт управления. Откачка, наполнение камеры ИВ и их поглощение после эксперимента выполняются дистанционно из удаленного пульта управления.

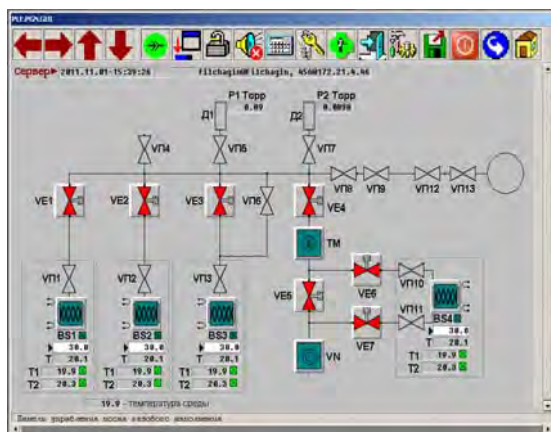


Рис. 2. Схема поста газового наполнения установки КПУ-200

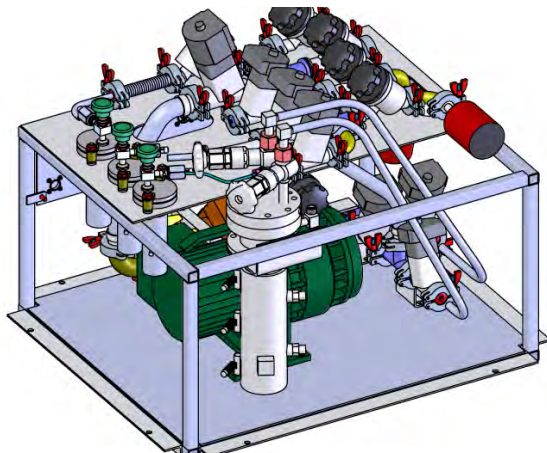


Рис. 3. Общий вид поста газового наполнения установки КПУ-200

Система откачки включает в себя форвакуумный VN и турбомолекулярные ТМ насосы (см. рис. 2). Для хранения и подачи и утилизации ИВ используются металлгидридные ловушки с интерметаллидным соединением: для подачи дейтерия – BS1, для подачи тритий-дейтериевой смеси BS3. Аналогичная по конструкции ловушка BS2 служит в качестве резервной для поглощения дейтерий-тритиевой смеси на случай если произойдет «отравление» металлгидрида ловушки BS3. Для более полного поглощения дейтерий-тритиевой смеси служит ловушка BS4 прокачного типа.

В эксперименте при разрядном токе $\sim 1,5$ МА камера генерирует импульсы нейтронного излучения длительностью на полувысоте 75–80 нс и интегральным выходом $\sim 1,3 \cdot 10^{13}$ ДТ-нейтронов. Импульс ДТ-нейтронов (рис. 4) зарегистрирован между 5,8 и 6,3 мкс, он характеризуется двухпиковой структурой. Вклад второго пика в интегральный выход составляет ~ 20 –30 %, а интервал времени между пиками – 150 нс. В спектральном интервале 0,3–14,5 МэВ флюенс нейтронов на корпусе камеры по ее оси равен $\sim 9 \cdot 10^9$ см $^{-2}$. Средняя энергия нейтронов в указанной части спектра равна 11,9 МэВ. Доля нейтронов в диапазоне энергий 13,5–14,5 МэВ составляет 78,4 % от общего спектра.

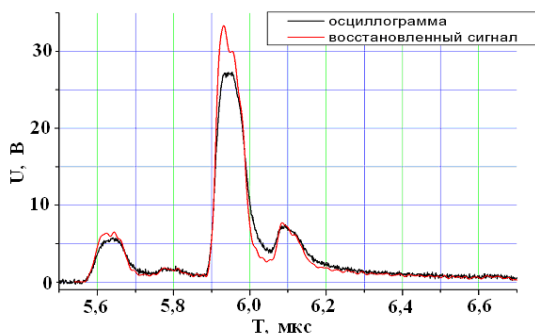


Рис. 4. Структура импульса нейтронного излучения

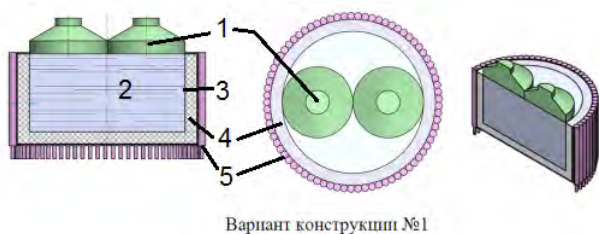
4. ТРИТИЕВЫЙ ИСТОЧНИК АКТИВНОСТЬЮ 40 МКИ И ГЕЛИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА НЕЙТРИНО

В 2000^x годах ВНИИЭФ разрабатывал интенсивный искусственный источник (анти)нейтрино активностью до 40 МКИ /24/ для эксперимента по поиску магнитного момента нейтрино на уровне 10^{-12} магнетона Бора с детекторами, регистрирующими рассеяния нейтрино на электроны с порогом регистрации ~ 10 эВ /25/. В то время ВНИИЭФ была предложена схема тритиевого источника, в которой 4 кг трития помещаются в 80 трубчатых элементов (ТЭ) на тритиде титана. В одном ТЭ содержится 50 г трития (500 кКи) и обращение с ним осуществляется как с ловушкой для хранения трития в рамках действующей нормативной базы РФ по обращению с тритием. Были проработаны вопросы транспортировки и обращения с таким ТЭ на всех этапах его жизненного цикла /20/. Разработкой детекторов занимались ИТЭФ и ОИЯИ. Од-

нако создать детекторы с необходимыми характеристиками тогда не удалось. Проект был заморожен.

В 2012 г. появилось новое предложение /8/ по созданию детектирующей системы. Суть предложения заключается в детектировании рассеяния нейтрино на электронах атомов жидкого гелия: $e^- + \nu = e^- + \bar{\nu}$. 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. Для проведения эксперимента с данным детектором тритиевый источник (анти)нейтрино является лучшим кандидатом. При использовании детектора с 10 кг жидкого гелия и ИТИН с активностью 40МКи можно получить ограничение на лабораторный предел ММН на уровне $10^{-12} \mu\text{B}$ (в 10 раз меньше существующих ограничений).

Схема эксперимента выглядит следующим образом (рис. 5) /26, 27/. Детектор, представляющий собой сосуд, заполненный 10 кг жидкого гелия, просматривается фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), которые регистрируют вспышки света от рассеяния нейтрино на электронах гелия. ТЭ (рис. 6) тритиевого источника окружают по периферии детектор. При 1-4 кг трития средняя плотность потока нейтрино на поверхности детектора составляет $(1-4) \cdot 10^{14} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.



Вариант конструкции №1

Рис. 5. Схема эксперимента по измерению магнитного момента нейтрино с тритиевым источником и гелиевым детектором: 1 – фотоумножители; 2 – жидкий гелий; 3 – слой тетрафенилбутадиена; 4 – теплозащита; 5 – элементы ИТИН

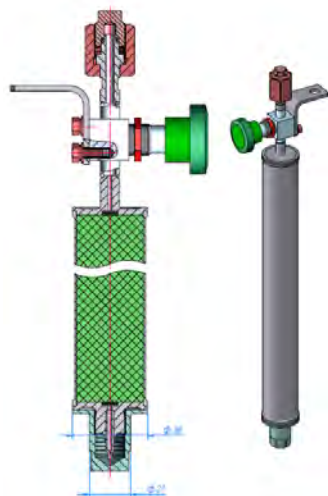


Рис. 6. Конструкция ТЭ

В настоящее время ведется проработка конструкции ТЭ, применительно к особенностям проведения эксперимента с жидко-гелиевым детектором, рассматривается возможность проведения эксперимента в низкофоновой подземной лаборатории (~600 м водного эквивалента). С учетом современных требований нормативно-правовой базы прорабатываются вопросы обращения с ИТИН и его элементами на всех этапах его жизненного цикла от изготовления до утилизации.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 5000 ГПа

Современная физика высоких плотностей энергии охватывает области состояний с концентрацией энергии в веществе выше 10^4 – 10^5 Дж/см³, что соответствует энергии связи конденсированных сред и уровню давлений в миллионы атмосфер. При таких параметрах вещество находится в плазменно-ионизированном состоянии вследствие термической ионизации и (или) ионизации давлением. Будучи экзотическими для земных условий, эти ультраэкстремальные состояния вполне характерны для большинства астрофизических объектов и определяют строение, эволюцию и светимость звезд, планет солнечной системы, а также открытых недавно экзопланет /10/.

Исследованиями в этой области экспериментальной физики ВНИИЭФ занимается с 70^х годов прошлого столетия, используя для этих целей пороховые и легко газовые ускорители – «пушки», взрывные генераторы мощных ударных волн (УВ), магнитокумулятивные генераторы, мощные лазерные установки, сильноточные генераторы мощных импульсов электрического тока, ускорители заряженных частиц и возможные комбинации этих устройств. Для снижения эффектов необратимого нагрева исследуемых материалов широкое распространение получили устройства, трансформирующие ударное сжатие в квазиизэнтропическое, когда сжатие осуществляется последовательностью падающих и отраженных УВ, позволяя получить более высокие степени сжатия (в 10–50 раз) и менее высокие температуры по сравнению с однократным ударно-волновым сжатием. В этих исследованиях наибольшее применение во ВНИИЭФ нашли экспериментальные одно- и двухкаскадные устройства цилиндрической и сферической геометрии, с помощью которых было реализовано квазиизэнтропическое сжатие водорода, дейтерия и инертных газов. В последние годы прогресс в этой области исследований связан с применением трехлучевого рентгенографического комплекса с возможностью работы каждого излучателя в трехимпульсном режиме (см. рис. 7), что позволяет за один эксперимент регистрировать до девяти фаз движения оболочки и таким образом проследить за динамикой процесса сжатия газа /10/.

Для достижения более высоких давлений в исследуемых газах применяется двухкаскадное сферическое экспериментальное устройство (см. рис. 7) /28/. Сжатие газа во внутренней полости такой конструкции происходит через слой исследуемого газа, защищая, таким образом материал оболочки от прямого воздействия ВВ, что исключает выброс частиц металла в газовую полость, где измеряется средняя плотность.

Для заполнения экспериментальных устройств газом высокого давления в полевых условиях разработана многоцелевая Малогабаритная УСТАНовка Газов (МУСТАНГ) (см. рис. 8), в состав которой входит либо металлгидридный источник дейтерия на основе дейтерида ванадия /29/, либо термокомпрессорное оборудование /28/. МУСТАНГ оборудован автоматизированной системой, которая позволяет дистанционно проводить заполнение экспериментальных устройств необходимым газом до давлений 25–300 МПа. Следует отме-

тить, что во ВНИИЭФ создана серия установок МУСТАНГ с давлением до 400 МПа, которые успешно эксплуатируются как во ВНИИЭФ, так и на предприятиях отрасли.

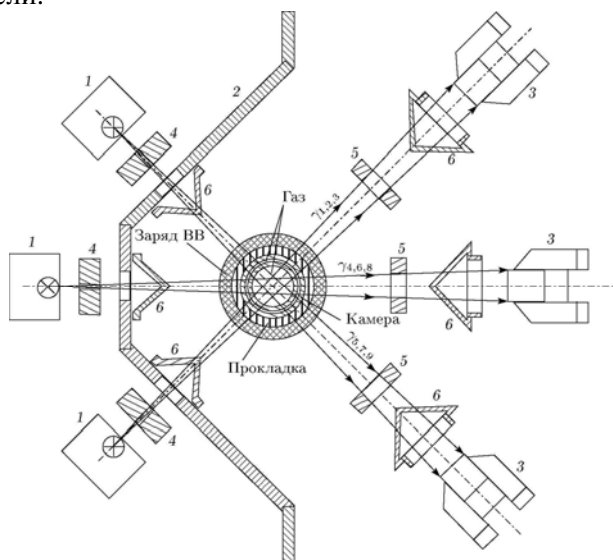


Рис. 7. Схема эксперимента на рентгенографическом комплексе ВНИИЭФ: 1 – бетатрон; 2 – защитное сооружение; 3 – регистратор; 4, 5 – коллиматор; 6 – защитный конус



Рис. 8. Общий вид установки МУСТАНГ в полевых условиях

В ходе исследований квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия во ВНИИЭФ достигнуты рекордные давления дейтерия (5450 ГПа) и гелия (4750 ГПа). В будущем мы планируем создать установку типа МУСТАНГ, обеспечивающую заполнение каскадов экспериментальных устройств различными газами.

6. ВОДОРОД И ГЕЛИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В работе /30/ по данному направлению деятельности РФЯЦ-ВНИИЭФ мы ограничились описанием созданных методик и оборудования для проведения исследований свойств конструкционных материалов, содержащих радиогенный ^3He , наработанный в матрице материалов методом «третиего трюка». С тех пор были завершены работы по исследованию никеля /31/ и нержавеющей стали (НС) 12X18H10T /32/, выполнены работы по исследованию сплава CrNi40MoCuTiAl /33/ и сплава CrNi35MoTiAl /34/.

Основные результаты исследований взаимодействия Ni, содержащего радиогенный ^3He с водородом можно суммировать следующим образом /31/. Наличие в чистом никеле радиогенного ^3He даже на уровне 5,6 аррм приводит к катастрофическим изменениям: происходит деградация механических свойств металла, выражающаяся в резком уменьшении его пластичности и повышении хрупкости; образуется открытая сквозная пористость, проявляющаяся в резком изменении характера сорбции водорода, а также в появлении молекулярного потока сквозь холодный образец в опытах по проницаемости.

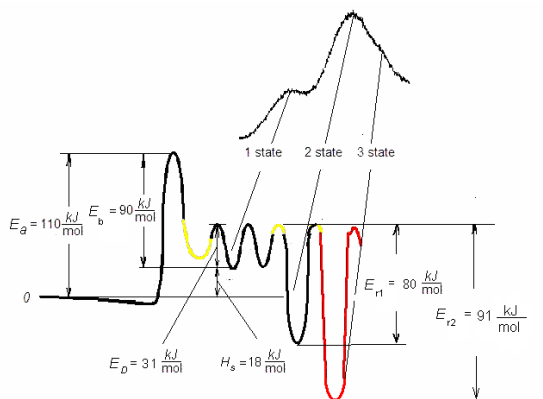


Рис. 9. Энергетическая диаграмма взаимодействия водорода с НС 12X18H10Т, содержащей 75 аррм ^3He

Присутствие ^3He в НС 12X18H10Т /32/ приводит к возникновению нового высокоэнергетического состояния – ловушек для водорода (рис. 9). В диапазоне исследованных концентраций ^3He в НС (до 160 аррм) количество водорода, захваченного дефектами НС, монотонно возрастает до концентрации ^3He 100 аррм, а затем стремится к насыщению. При повышении концентрации ^3He до ~500 аррм увеличивается и концентрация плейтлетов, при этом по размерам плейтлеты образуют две характерные группы с размерами ~8–10 и ~15–30 нм. Водород и ^3He при концентрациях до 500 аррм и их совместное воздействие не оказали существенного влияния на предел прочности образцов из НС 12X18H10Т в интервале температур 273–873К. Максимальное изменение характеристики σ_b , вызванное ^3He , наблюдается при ~500 аррм ^3He и температуре 873 К, по сравнению с исходным значением снижение временного сопротивления разрыву составляет 12–12,5 %.

Воздействие водорода высокого давления (80 МПа) на исходные образцы незначительно (~6 %) снижает пластические характеристики НС, в то время как ^3He при концентрациях 500 аррм приводит к снижению характеристик пластичности на 71–73 %, а синергетическое воздействие водорода и ^3He усиливает эту тенденцию (характеристики пластичности снижаются на 77–80 %).

Такое поведение материала прогнозируемо и полностью укладывается в существующие представления о поведении конструкционных материалов, содержащих радиогенный гелий, при их взаимодействии с водородом. Поэтому неожиданными оказались результаты, полученные в работе /33/. При исследовании сплава ХН40МДТЮ с концентрациями ^3He до 190 аррм было получено, что при комнатной температуре в инертной среде пластические характеристики сплава снижаются на 30–34 %, в то время как при температуре 600 °С зависимость носит немонотонный характер – в диапазоне концентраций ^3He до 80 аррм пластические свойства материала снижаются, а затем повышаются при концентрациях ^3He до 190 аррм. Такое поведение материала требует проведения дополнительных исследований. Тем более что в результате испытаний сплава этого же типа ХН35ВТЮ, содержащего 560 аррм ^3He и исследованного в диапазоне температур до 600 °С каких либо аномальных отклонений от существующих представлений не обнаружено /34/. При температуре 600 °С временное сопротивление разрыву сплава, содержащего 560 аррм ^3He , уменьшается на 20 и на 35 % в среде гелия и водорода соответственно, по сравнению с аналогичными испытаниями при комнатной температуре. Изменения условного предела текучести незначительны, они не превышают 2 %, что находится в рамках погрешности измерений. Не удалось определить $\sigma_{0,2}$ при испытаниях в среде водорода при температуре 600 °С, так как разрушение образца произошло на упругом участке.

Максимальное охрупчивание образцов с наибольшим содержанием ^3He наблюдается при температуре 600 °С. Снижение относительного удлинения и относительного сужения после разрыва в среде инертного газа при температуре 600 °С составило 86 и 71 % соответственно (по сравнению с испытаниями при комнатной температуре). В среде водорода при температуре 600 °С разрушение образцов произошло на упругом участке, δ_5 и ψ близки к нулю, т. е. произошло практически стопроцентное охрупчивание сплава.

7. ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПОРИСТОЙ АЛЮМОКЕРАМИКИ ДЛЯ ТРИТИЕВЫХ УСТРОЙСТВ

Одной из основных проблем при создании устройств, работающих с тритийсодержащими средами при повышенных температурах, являются диффузионные утечки трития. С одной стороны они приводят к ухудшению радиационной обстановки на месте проведения работ, а с другой – к безвозвратным потерям трития. Особенно остро эта проблема стоит перед конструкциями обратимых ловушек хранения трития и технологическими камерами, которые по роду своей работы должны десятки - сотни часов находится под давлением тритийсодержащей среды при повышенных температурах (камеры тритирования образцов, изготовление различного рода мишеней и т. п.). Си-

туация усугубляется еще и тем, что, как правило, нагрев этих устройств осуществляется внешним нагревателем, разогревая при этом силовой герметизирующий корпус и увеличивая время разогрева собственно целевого объекта (гидрида металла, в случае ловушки, либо образца, в случае тритирования материала). Для уменьшения диффузионных утечек трития применяются различные защитные покрытия, выполняются дополнительные вакуумируемые полости между силовым и герметизирующим корпусом, вводится во внутреннюю полость силового корпуса нагреватель и т. п., что значительно усложняет конструкцию.

Кардинальным решением данной проблемы может быть применение в качестве конструкционного материала устройств такого типа беспористой керамики из Al_2O_3 . Это делает возможным применение прямого индукционного нагрева непосредственно объекта взаимодействия с тритием (гидридообразующего металла либо насыщаемых материалов) без существенного нагрева силового и герметизирующего корпуса.

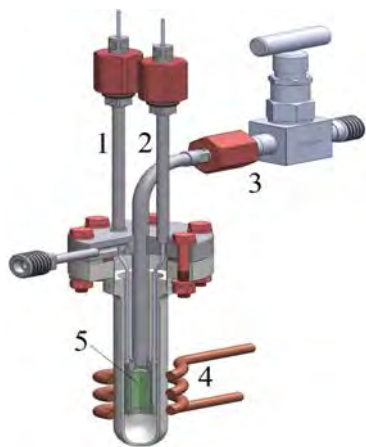


Рис. 10. Прототип ловушки для хранения трития: 1, 2 – герметичные каналы для ввода контрольных термопар; 3 – трубопровод для подачи и вывода газа; 4 – индукционный нагреватель; 5 – порошок титана

В рамках работ /35, 36/ проведены сравнительные исследования проницаемости дейтерия через камеры, изготовленные из аустенитной нержавеющей стали AISI304 и из керамики Al_2O_3 , при температуре 773 К и давлении дейтерия 1200 мбар установлено, что поток диффундирующего дейтерия из стальной камеры составляют $8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{с}$, а из керамической камеры не превышают чувствительности метода измерения, что составляет $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$.

В ходе проведения ресурсных испытаний двух керамических камер после 1000 циклов термо-баро циклирования была показана работоспособность конструкции камеры без разрушения и потери герметичности. Кроме того, керамическая камера остается герметичной при её нагружении внутренним давлением вплоть до 10 бар.

Экспериментально показана возможность использования керамики и индукционного нагрева для создания ловушки обратимого хранения трития (рис.10), что, в свою очередь, позволит для устройств такого типа:

- снизить как минимум на 4 порядка проницаемость ИВ через герметичный корпус устройства, обеспечив тем самым снижение диффузионных потерь ИВ;
- повысить безопасность эксплуатации устройства при работе с тритием;
- снизить на сотни градусов температуру герметизирующего корпуса;

– значительно (от десятков часов до минут) сократить времена проведения технологических операций, связанных с нагревом гидридообразующего металла или гидрида;

– достичь более полного извлечения ИВ из металлгидрида за счет более высокого его разогрева, вплоть до плавления, в случае окончательной утилизации устройства.

8. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОМПАКТНОГО ГИДРИРОВАНИЯ ДРОБИ ТИТАНА

Во второй половине 2013 года перед ВНИИЭФ была поставлена задача по разработке технологии гидрирования дроби титана и создания опытно-промышленных образцов установок гидрирования высокой производительности. Дробь гидрида титана (ДГТ) используется в качестве наполнителя в новых композиционных материалах на цементной основе, используемых для высокоэффективной биологической защиты транспортных ядерных энергетических установок. Сотрудниками ВНИИЭФ в сжатые сроки были опробованы три технологии получения

ДГТ /37/. На первом этапе каждой технологии осуществлялась активация исходной дроби титана (ДТ) в динамическом вакууме, затем: 1) к ДТ прошедшей активацию подавался водород при температуре активации с последующим контролируемым охлаждением ДТ в среде водорода; 2) через ДТ пропускался поток смеси водорода и гелия; 3) к ДТ, находящейся при температуре активации, с контролируемой скоростью подавался водород с постепенным повышением давления, после достижения требуемой степени насыщения титана, подача водорода прекращалась и устройство гидрирования охлаждалось неконтролируемым образом до комнатной температуры. По итогам этой работы для практической реализации был предложен третий способ гидрирования. В короткие сроки были разработаны и изготовлены образцы опытно-промышленных установок получения ДГТ производительностью 35 кг ДГТ в сутки. На рис. 11 представлен общий вид опытно-промышленной установки. В ходе разработки были проведены оптимизационные расчеты конструкции аппарата насыщения и режимов его работы /38/. В настоящее время осуществляется отработка технологии производства ДГТ на этих установках.

После отработки технологии планируется создание промышленных установок и оснащение ими участка по серийному производству ДГТ на ПО «Маяк».



Рис. 11. Общий вид опытно-промышленной установки производства ДГТ

9. МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ С ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА

Все исследовательские, испытательные, опытно-промышленные и промышленные установки и комплексы, создаваемые во ВНИИЭФ в последние десятилетия, оснащены автоматизированными системами контроля и управления (АСКУ) (см., например, главу 4 в сборнике /39/. Несмотря на различное назначение этих установок, их системы измерения и управления имеют много общего по структуре, выполняемым функциям, аппаратурному и программному обеспечению. По своей структуре это системы на базе персональных компьютеров, к которым подключена распределенная локальная сеть из «интеллектуальных» модулей аналогового и дискретного ввода-вывода серии I-7000 (фирма ICP DAS). Именно с помощью модулей решается задача измерения аналоговых и дискретных электрических сигналов, а также выработка аналоговых и дискретных электрических сигналов управления. Применение распределенных систем управления и сбора данных сегодня является основной тенденцией при автоматизации сложных установок, в которых оборудование занимает большую площадь, а основной процесс сопровождается массой вспомогательных.

Уникальной особенностью АСКУ установок, работающих с изотопами водорода, является использование собственного многоцелевого пакета (CRW-DAQ) /40/, ориентированного на решение определенного круга задач измерений и управления. Пакет не является жесткой программой, пригодной только для конкретной установки, а скорее средой разработки, совмещенной со средой исполнения. Пакет обеспечивает единую для всех установок графическую среду (предоставляет возможности, необходимые для всех установок - отображение информации на графиках, в таблицах, организацию активных мнемосхем и т. д.). Пакет снабжен встроенным транслятором языка Pascal. В результате на всех установках работает один и тот же программный пакет, а вся специфика конкретной установки описывается в виде конфигурационных файлов и программ на встроенном языке. Процедура разработки прикладных программ для систем измерения и управления конкретными установками и их сопровождение становятся достаточно простыми и не требуют привлечения программистов высокой квалификации.

Тем не менее, ахиллесовой пятой АСКУ установок, использующихся для проведения ОКР и в серийном производстве, было отсутствие метрологически аттестованных методик выполнения измерений. Этот пробел был практически устранен в 2013 году метрологической аттестацией отраслевой лабораторий измерительной техники ряда основных методик выполнения измерений: температуры, давления и относительной деформации. При разработке методик произведен расчет погрешностей измерений физических величин типовых измерительных каналов, как при нормальных условиях окружающей среды, так и при условиях, отличных от нормальных. Проведен большой объем аттестационных измерений и их статистическая обработка для установления метрологических характеристик. Детали этой работы подробно изложены в /41/.

Существенным шагом в области работы с изотопами водорода и, в частности, в области тритиевых технологий является разработка и внедрение в практику исследований безотборного метода определения состава газовых смесей изотопов водорода с помощью КРС спектроскопии /42, 43/. Преимущества КРС спектроскопии можно суммировать следующим образом:

- работа без отбора проб, при этом не изменяется давление и температура исследуемой смеси, а так же не изменяется геометрия и материал емкости, содержащей исследуемый газ, следовательно, не нарушается концентрация гетероядерных молекул водорода (HD, HT, DT). В случае работы с тритием это не приводит к образованию радиоактивных газообразных отходов;

- отсутствие аппаратного влияния, спектроскопия КРС является бесконтактным методом измерений, т.е. процесс анализа не приводит к значительным изменениям состава исследуемой смеси, и таким образом мы получаем наиболее объективные данные об объекте исследования;

- работа в режиме реального времени, анализ исследуемой смеси происходит за секунды, это дает возможность практически непрерывного отслеживания изменения состава исследуемой смеси;

- определение всех гомоядерных и гетероядерных молекул водорода.

На рис. 12 представлен общий вид стенда КРС спектроскопии для определения состава газовых смесей изотопов водорода. Стенд создан во ВНИИЭФ на базе монохроматора-спектрометра MS247, лазера МОЦАРТ-5 и набора оптических зондов, изготовленных с использованием оптических волокон. Стенд позволяет проводить измерения при давлениях изотопов водорода до 400 МПа, погрешность измерений составляет 1–1,5 % абс. В ближайшей перспективе планируется разработка и метрологическая аттестация методики выполнения измерений с помощью данного метода.



Рис. 12. Общий вид передвижного стенда КРС спектроскопии

Выводы

С использованием оборудования и методик работы с тритием и тритий-содержащими веществами, созданными во ВНИИЭФ, специалистами ВНИИЭФ в коллаборации с ОИЯИ проведены работы и получены физические результаты мирового уровня в области исследований реакций радиоактивного

захвата $d+d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ из состояния $J = 1$ мюонной молекулы $dd\mu$ и в области исследованию характеристик нейтронно-избыточных ядер ${}^8\text{He}$ и ${}^{10}\text{He}$.

Создан передвижной источник нейтронов типа плазменного фокуса с рекордным интегральным выходом ДТ нейтронов $\sim 1,3 \cdot 10^{13}$.

Готовятся эксперименты по определению вероятности протекания реакции $p\tau\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + e^+e^-$ и поиску магнитного момента нейтрино на уровне 10^{-12} магнетона Бора с детектором использующим эффект рассеяния нейтрино на электронах атомов жидкого гелия и интенсивным (до 40 МКи) тритиевым источником.

В ходе исследований квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия во ВНИИЭФ достигнуты рекордные давления дейтерия (5450 ГПа) и гелия (4750 ГПа).

В области прикладных исследований:

- проведены всесторонние исследования взаимодействия изотопов водорода с никелем и нержавеющей сталью 12Х18Н10Т, содержащими ${}^3\text{He}$. Аналогичные работы проводятся с высокопрочными сплавами аустенитного типа CrNi40MoCuTiAl и CrNi35MoTiAl;

- показана возможность применения беспористой алюмооксидной керамики в качестве КМ устройств, работающих с тритийсодержащими средами при высоких температурах. Обсуждены преимущества конструкций с использованием данной керамики;

- метрологической аттестацией методик измерения давления, температур и деформаций узаконено применение АСКУ в качестве измерительного инструмента регистрации физических параметров при проведении исследований, испытаний и технологических процессов с изотопами водорода;

- в практику исследований с нерадиоактивными ИВ внедрен безотборный метод определения состава газовых смесей ИВ с помощью КРС спектроскопии. Следующим шагом планируется создание оборудования для работы с тритийсодержащими газами.

Приведенные здесь работы выполнены при поддержке РФФИ (гранты 12-02-01047 и 12-02-12121-офи_м), МНТЦ (проекты 2276 и 3672).

Список литературы

1. Сб. докладов Четвертой Международной конференции и Шестой Международной Школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'10». Саров, 2011, 340 стр.

2. Baluev V. V. et al. Experimental search for the radiative capture reaction from muonic molecule state $J = 1$. 2011. Vol. 113, N 1. P. 68–74.

3. Bogdanova L. N. et al. Experimental Study of Nuclear Fusion Reactions in a $p\tau\mu$ System. Physics of Particles and Nuclei Letters. 2012. Vol. 9, N 8. P. 605–614.

4. Golovkov M. S. et al. The ${}^8\text{He}$ and ${}^{10}\text{He}$ spectra studied in the (t, p) reaction. Physics Letters B 672 (2009) 22–29.

5. Grigorenkov L. V. et al. Soft Dipole Mode in ^8He . *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2009. Vol. 6, N 2. P. 118–125.
6. Fomichev A. S. et al. Long-range plans for research with radioactive ion beams at JINR. Preprint JINR E7-2012-73.
7. Zavyalov N. V. et al. A Source with a 10^{13}DT Neutron Yield on the Basis of a Spherical Plasma Focus Chamber. *Plasma Physics Reports*. 2013. Vol. 39, N 3. P. 243–247.
8. Martemynov V. P., Tsinoev V. G. *Physics of Atomic Nuclei*. 2011. Vol. 74, N 1.
9. Мочалов М. А. и др. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия при давлении ~ 5000 ГПа. *Письма в ЖЭТФ*. 2012. Т. 96. Вып. 3. С. 172–177.
10. Мочалов М. А. и др. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500–2000 ГПа. *ЖЭТФ*. 2012. Т. 142. Вып. 3. С. 696–709.
11. Голубков А. Н. и др. Разработка технологии получения дробы титана гидрированной. Тезисы доклада на IHISM'2014, г. Саров.
12. Тихонов В. В., Юхимчук А. А., Мусяев Р. К. Применение спектроскопии комбинационного рассеяния света для анализа газовых смесей изотопов водорода при высоких давлениях. Тезисы доклада на IHISM'2014, г. Саров.
13. Юхимчук А. А. и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза. Приборы и техника эксперимента. 1999. № 6. С. 17–23.
14. Bom V. R. et al. Experimental investigation of muon-catalyzed fusion in wide ranges of D/T mixture condition. *JETP*, 100 (4) 663 (2005).
15. Yukhimchuk A. A. et al. Tritium target for research in exotic neutron-excess nuclei. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A513* 439 (2003).
16. Oganessian Yu.Ts. et al. Hydrogen-4 and hydrogen-5 from transfer reactions induced by a 57.5-MeV triton beam on deuterium and tritium targets // Proc. of the Int. Conf. Nuclear Physics at Border Lines, Lipari (Messina), Italy, 21–24 May 2001. P. 372–375.
17. Оганесян Ю. Ц. и др. Изучение структуры ультранейтронно-избыточных ядер водорода и гелия с использованием реакций радиоактивных пучков на тритиевой мишени. *Известия Академии Наук. Серия физическая*, 66 (5) 619 (2002).
18. Golovkov M. S. et al. Evidence for resonance states ^5H . *Physics Letters B*, 556 70–75 (2003).
19. Golovkov M. S. et al. Observation of Excited States in ^5H . *Physical Review Letters* 93 262501 (2004).
20. Fomichev A. S. et al. *Eur. Phys. J. A* 42 465–469 (2009).
21. Sidorchuk S. I. et al. Structure of ^{10}He low lying states uncovered by correlation. *Phys. Rev. Lett.* 108, 202502 (2012).
22. Макеев Н. Г., Румянцев В. Г., Черемухин Г. Н. Тр. ученых ядерных центров России / Под ред. Н. Г. Макеева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 5 281 (1996).

23. Макеев Н. Г., Румянцев В. Г., Маслов В. В. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Т. IX-3 Радиационная плазмодинамика / Под ред. В. Е. Фортова. М.: ЯНУС-К, 2007. С. 176.

24. Yukhimchuk A. A. et al. Status of works on a 40-MCi tritium source for the measurement of the antineutrino magnetic moment. *Fusion Sci&Technol.*, 48 731 (2005).

25. Neganov B. S. et al. Status of the experiment on the laboratory search for the electron antineutrino magnetic moment at the level $\mu_\nu \leq 3 \cdot 10^{-12} \mu_B$. *J. Nucl. Phys.*, 64(11) (2001) 2033–2039.

26. 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 Sci&Technol* (in press).

27. Попов В. В. и др. Разработка малогабаритного интенсивного тритиевого источника (анти)нейтрино. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'14». Сб. тезисов докладов Пятой международной конференции и Девятой международной Школы им. А. А. Курдюмова. Саров, 2014. С. 217.

28. Баурин А. Ю. и др. Аппаратура, методика и результаты экспериментов по измерению квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия при давлениях 1500–5000 ГПа. Сб. докладов Восьмой Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'12 junior» / Под ред. А. А. Юхимчука. Саров, 2013. С. 309–318.

29. Голубков А. Н., Кононенко А. А., Юхимчук А. А. Термодесорбционные источники изотопов водорода на основе гидрида ванадия. В сб. «Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования» / Под ред. А. А. Юхимчука. Саров, 2009. С. 516–525.

30. Yukhimchuk A. A., Il'kaev R. I. RFNC-VNIIEF experience in development and operation of hydrogen isotopes gas-handling systems for basic research. *Fusion Sci&Technol.*, 54 137–142 (2008).

31. Kompaniets T., Yukhimchuk A., Denisov E. et al. Hydrogen Interaction with Nickel Containing Radiogenic Helium. *Fusion Sci&Technol.*, 60, 1552 (2011).

32. Yukhimchuk A., Boitsov E., Grisheckin S. et al. Hydrogen Interaction with Stainless Steel Containing Radiogenic ^3He . *Fusion Sci&Technol.*, 60, 1556 (2011).

33. Maksimkin I., Yukhimchuk A., Boitsov E. et al. Radiogenic ^3He and Hydrogen Impact of Mechanical Properties and Structure of CrNi40MoCuTiAl Alloy. *Fusion Sci&Technol.*, 60, 1519 (2011).

34. Maksimkin I. et al. Mechanical Properties and Permeability of Hydrogen Isotopes through CrNi35WTiAl Alloy Containing Radiogenic Helium. *Fusion Sci&Technol* (in press).

35. Yukhimchuk A.A. et al. Application of Nonporous Alumina Based Ceramics as Structural Material for Devices Handling Tritium at Elevated Temperatures. *Fusion Sci&Technol* (in press).

36. Максимкин И. П. и др. Исследование алюмооксидной керамики как перспективного конструкционного материала для тритиевых технологий. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'14», сб. тезисов докладов Пятой международной конференции и Девятой международной Школы им. А. А. Курдюмова. Саров, 2014. С. 60.

37. Голубков А. Н. и др. Разработка технологии получения гидрированной дроби титана. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'14», сб. тезисов докладов Пятой международной конференции и Девятой международной Школы им. А. А. Курдюмова. Саров, 2014. С. 102.

38. Попов В.В. Расчет физико-химических процессов в аппарате для получения дроби титана гидрированной. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'14», сб. тезисов докладов Пятой международной конференции и Девятой международной Школы им. А. А. Курдюмова. Саров, 2014. С. 124.

39. Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования. Сб. статей под ред. А. А. Юхимчука. Саров, 2009.

40. Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г. А. В. Курякин, Ю. И. Виноградов. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ).

41. Логинов М. В. и др. Метрологическое обеспечение измерений при проведении испытаний в среде водорода высокого давления (до 500 МПа). «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'14», сб. тезисов докладов Пятой международной конференции и Девятой международной Школы им. А. А. Курдюмова. Саров, 2014. С. 60.

42. Tikhonov V. V. et al. The use of Raman spectroscopy in the study of isotopic exchange kinetics in a gaseous mix of hydrogen isotopes at pressures up to 200 MPa. Fusion Sci&Technol (in press).

43. Тихонов В. В., Юхимчук А. А., Мусяев Р. К. Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для анализа газовых смесей изотопов водорода при высоких давлениях. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'14», сб. тезисов докладов Пятой международной конференции и Девятой международной Школы им. А. А. Курдюмова. Саров, 2014. С. 130.