

УДК 621.039

## АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМАТИКИ «ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ»

*А.А. Юхимчук (РФЯЦ — Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров, Россия)*

Рассмотрены актуальные задачи, связанные с взаимодействием изотопов водорода с материалами ядерных реакторов (деления) нового поколения, термоядерных реакторов и установок водородной энергетики.

**Ключевые слова:** взаимодействие изотопов водорода с материалами, новые материалы, D—T-топливный цикл, водородная энергетика, материаловедческие исследования.

TIMELY RELEVANT PROBLEMS CONNECTED WITH INTERACTION OF HYDROGEN ISOTOPES AND STRUCTURAL MATERIALS. A.A. YUKHIMCHUK. The paper analyses timely relevant problems connected with interaction of hydrogen isotopes and materials of nuclear reactors of the new generation as well as fusion and hydrogen power plants.

**Key words:** hydrogen isotopes — materials interaction, new materials, D—T-fuel-cycle, hydrogen power engineering, material testing.

### ВВЕДЕНИЕ

Тематика «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» остается актуальной уже в течение более ста лет. Множество опубликованных научных работ, тысячи монографий не снимают этой актуальности и по сегодняшний день. На разных этапах развития науки, технологии, промышленности возникали новые задачи, решение которых требовало новых научных подходов, создания новых методов изучения водородных систем. Каждый раз задача решалась тем или иным способом: создавались материалы, стойкие к воздействию водородосодержащей среды, выбирались соответствующие методы защиты материалов либо находились приемлемые технические подходы для решения конкретной задачи. Сегодня тематика переживает свой очередной подъём. Связано это, в первую очередь, с бурным развитием водородной и термоядерной энергетики, ренессансом атомной энергетики.

Актуальные задачи современного этапа развития тематики можно условно разделить на следующие направления:

- создание материалов для ядерных реакторов нового поколения;
- создание материалов и топливного цикла термоядерных реакторов;
- создание материалов и инфраструктуры водородной энергетики.

### СОЗДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Основной концепцией развития атомной энергетики в настоящее время является создание энергетических установок, обеспечивающих:

- расширенное воспроизводство вторичного ядерного горючего и использование в ядерном топливном цикле природного урана, а впоследствии — тория;
  - дожигание долгоживущих радиоактивных отходов и нераспространение ядерных материалов.
- Другими словами — всё, что пришло на ядерную установку (реактор) сжигается, а на выходе — лишь отходы, по активности сопоставимые с природным ураном, что позволяет сохранить естественную радиоактивность на планете.

Данная концепция подразумевает использование реакторов на быстрых нейтронах (БН) [1, 2]. В России это быстрые реакторы (БН-600, БН-800, БРЕСТ и др.), которые во многом составят основу ядерной энергетики во второй половине нынешнего столетия.

Параметры реакторов на быстрых нейтронах:

Плотность потока нейтронов $n/(см^2 \cdot с)$ . . .	$3 \cdot 10^{15} — 10^{16}$
Скорость генерации $Ne$ , $млн^{-1}$ ат./год . . .	20—30
Скорость набора дозы, сна/год . . .	100—200
Температура, °С . . .	400—650

Высокие температуры и дозы облучения в реакторах БН приводят к тому, что ключевой для таких реакторов становится проблема создания конструкционного материала оболочек твэлов, обладающего комплексом механических и технологических свойств, совместимостью с теплоносителем и топливом, а также стабильностью свойств при нейтронном облучении [1].

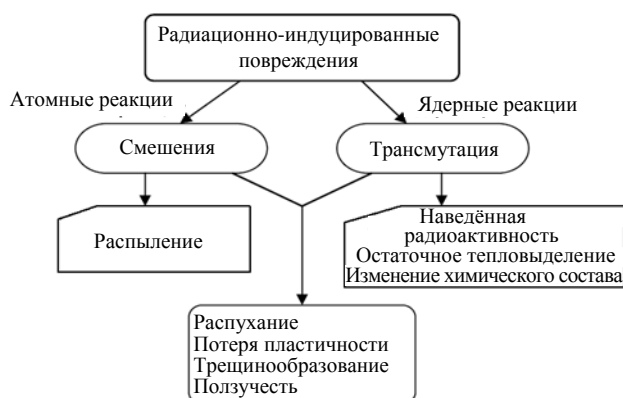


Рис. 1 Схема процессов, происходящих в конструкционных материалах ядерного реактора под воздействием радиационного облучения

Что же происходит с конструкционными материалами под воздействием потока нейтронов?

Нейтроны наряду с другими продуктами ядерных процессов (осколками деления ядер,  $\gamma$ -излучением и пр.) вызывают в твёрдом теле радиационно-индуцированные повреждения (см. рис. 1).

Основными механизмами радиационно-индуцированных повреждений являются:

— смещение атомов из положения их равновесия в решётке, происходящее в процессе упругого и неупругого рассеяния частиц излучения на атомах облучаемого материала, их последующей миграции и кластеризации [1, 3]. Уровень повреждаемости материала выражается в единицах сна (смещение на атом) — количество раз, которое атом смещается при заданном потоке частиц (последний обычно выражается в  $\text{МВт}/\text{м}^2$ );

— трансмутация (от лат. trans — сквозь, через, за; mutatio — изменение, перемена) ядер облучаемого материала под воздействием частиц излучения. Следствием трансмутации ядер является изменение химического состава конструкционного материала, наработка в материале нестабильных (радиоактивных) изотопов (наведённая радиоактивность), следствием радиоактивного распада которых является выделение дополнительного тепла (остаточное тепловыделение). Наиболее важными продуктами трансмутации являются газообразные гелий и водород. Атомы гелия и водорода, образовавшиеся в результате трансмутационных реакций, приводят к изменению макроскопических свойств облучаемого материала (потере пластичности, охрупчиванию, вакансионному распуханию и т.д.). Концентрация атомов — продуктов реакций трансмутации измеряется в единицах  $\text{аррм}$  (atomic particle per million) (или  $\text{млн}^{-1}$  ат.) — количество атомов трансмутанта в расчёте на один миллион атомов исходного материала.

Эти процессы могут приводить к катастрофическому изменению свойств конструкционных материалов (микроструктуры, механических свойств, внешних размеров вследствие явлений распухания, трещинообразования и ползучести).

Автор работы [1] называет три основных источника поступления He и водорода в решётку нержавеющей стали:

— ядерная реакция ( $n, \alpha$ ) на изотопе  $^{10}\text{B}$ , входящем в состав бора (20%) в  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Обнаружено, что поступление He в материал выгородки активной зоны реактора ВВЭР-1000 составляет  $240\text{—}300 \text{ млн}^{-1}$  ат. He/год в слое металла толщиной  $3 \cdot 10^{-4}$  см и зависит от концентрации  $\text{H}_3\text{BO}_3$  в теплоносителе при регулировании мощности в процессе выгорания топлива;

— реакции тепловых нейтронов с элементами стали и, в первую очередь, с Ni. В ( $n, \alpha$ )-реакциях в нержавеющей стали в зависимости от её химического состава, спектра нейтронов и срока эксплуатации нарабатывается  $(6\text{—}10)10^{-7} \text{ млн}^{-1}$  ат. He/с, а в ( $n, p$ )-реакциях —  $(3,4\text{—}23)10^{-7} \text{ млн}^{-1}$  ат. H/с или  $20\text{—}30 \text{ млн}^{-1}$  ат. He/год и  $10\text{—}70 \text{ млн}^{-1}$  ат. H/год соответственно;

— основным каналом поступления водорода в стальные элементы внутрикорпусных устройств является реакция коррозии на границе сталь/вода  $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$ . Скорость поступления водорода из теплоносителя составляет  $\sim 3 \cdot 10^{-4} \text{ млн}^{-1}$  ат. H/с (или  $3000 \text{ млн}^{-1}$  ат. H/год) для условий активных зон реакторов деления с водой под давлением.

Основными задачами тематики по этому направлению являются:

— в области фундаментальных исследований — изучение механизма взаимодействия водорода и гелия с материалами и на основании этих знаний создание конструкционного материала (КМ), мало чувствительного к данным факторам;

— в области прикладных исследований — создание средств защиты КМ от воздействия водорода, проникающего в материал из теплоносителя (защитные покрытия, конструктивные и технологические решения и т.п.).

## СОЗДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

В настоящее время принято, что в качестве основного КМ несущих элементов blankets и вакуумной камеры международного термоядерного реактора (ИТЭР) будет использоваться нержавеющая сталь аустенитного класса SS316. Такое решение обусловлено невысокими нейтронными (для первой стенки поток  $0,78 \text{ МВт/м}^2$  и интегральная нагрузка в кампанию  $\sim 600 \text{ МВт}\cdot\text{ч/м}^2$ ) и тепловыми ( $0,1\text{--}0,3 \text{ МВт/м}^2$ ) нагрузками в ИТЭР. Однако для термоядерных реакторов (ТЯР) следующего поколения (ДЕМО, прототипы коммерческих реакторов) понадобятся другие типы КМ, стойких к воздействию нейтронов термоядерного синтеза и более высоких тепловых нагрузок. На сегодняшний день различные страны в качестве кандидатных КМ blankets рассматривают следующие материалы: Европа — сталь ферритно-мартенситного класса EUROFER (9% Cr—W—V—Ta-steel (0,1% C)) и SiCf/SiC; Россия и США — ванадиевые сплавы типа V—4Ti—4Cr и ферритные стали; Япония — ферритную сталь типа F82H.

КМ следующего поколения ТЯР должны обладать [4]:

- хорошими физическими (теплопроводность, температурное расширение) и механическими (пластичность и трещиностойкость) свойствами;
- достаточной пластичностью при температурах хрупкого разрушения ниже  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  в конце жизненного цикла (доза облучения не менее 80 сна — для ДЕМО и 150 сна — для прототипов коммерческих реакторов);
- минимальной чувствительностью к водородному и гелиевому охрупчиванию;
- хорошей совместимостью с жидким литием (коррозионная стойкость);
- низкой водородопроницаемостью;
- низкой остаточной наведённой активностью при нейтронном облучении;
- геометрической устойчивостью в условиях реакторного воздействия (малое распухание).

Для обеспечения этих требований необходимо проведение исследований характеристик КМ при различных воздействиях и в первую очередь при их облучении нейтронами с энергией 14 МэВ и, желательно, при одновременном воздействии реализующихся в ТЯР тепловых потоков. К сожалению, получить сочетание всех этих факторов возможно лишь собственно в ТЯР, создать который необходимо из КМ, уже имеющих необходимые характеристики и обеспечивающих необходимый ресурс работы ТЯР. Отсюда возникает необходимость в создании установок и методик, позволяющих в той или иной степени моделировать свойства КМ после их длительной эксплуатации в ТЯР. Основными из них являются:

- создание нейтронных источников с энергиями близкими к энергии нейтронов синтеза — 14,1 МэВ и потоками  $\sim 10^{14} \text{ н/см}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ;
- создание установок, моделирующих тепловые нагрузки  $\sim 0,5 \text{ МВт/м}^2$ ;
- разработка методик, позволяющих получать высокие концентрации гелия (вплоть до  $1500 \text{ млн}^{-1} \text{ ат.}$ ) и водорода (вплоть до  $6750 \text{ млн}^{-1} \text{ ат.}$ ) в матрице КМ и исследовать их совместное воздействие на физико-механические свойства КМ.

На сегодняшний день предложено несколько проектов интенсивных источников нейтронов, наиболее известными из которых являются: IFMIF [5], MC INS [6], GDT [7] и на базе токамака с  $Q \sim 3$  [8]. Следует сразу оговориться, что все источники, кроме IFMIF, который имеет непрерывный спектр нейтронов с максимальной энергией более 35 МэВ, построены на дейтерий-тритиевом топливном цикле, т.е. спектр нейтронов практически полностью соответствует спектру нейтронов в термо-ядерных реакторах (см., например, рис. 2 [9]).

Нейтронный источник IFMIF — два ускоренных пучка дейтронов  $D^+$  с энергией 40 МэВ и интенсивностью 250 мА каждый взаимодействуют с высокоскоростной ( $\sim 20 \text{ м/с}$ ) струёй жидкого Li, в результате чего за секунду рождается  $\sim 10^{17}$  нейтронов, которые имеют непрерывный спектр с максимальной энергией более 35 МэВ (см. рис. 2). По-

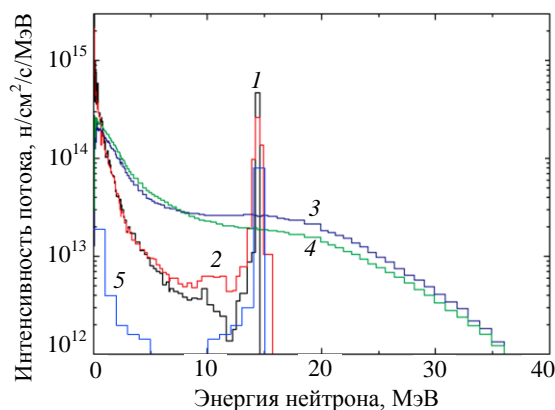


Рис. 2. Сравнение энергетического спектра нейтронов в ДЕМО (1), ИТЭР (2), Cel 102 IFMIF (3), Cel 141 IFMIF (4),  $\mu\text{CF}$  (5) [10]

сколькую область взаимодействия пучков  $D^+$  с литием ограничена, то и область, в которой поток нейтронов имеет интенсивность  $10^{14}$  н·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>, имеет объём не более 0,3 л. Данный источник характеризуется большим градиентом потока нейтронов, что позволяет проводить исследования лишь малогабаритных образцов. Тем не менее на сегодняшний день в рамках соглашения по ИТЭР проект принят к реализации в ряду проектов «ускоренного продвижения» («Fast Track») к созданию термоядерной энергетики со штаб-квартирой в Роккашо (Rokkasho), Япония, и сроком реализации 2025—2030 гг. [11]. Планируется, что на данной установке в результате ( $n, \alpha$ )-реакций в исследуемых материалах за год можно будет наработать до 1000—1500 млн<sup>-1</sup> Н и до 250—600 млн<sup>-1</sup> He.

Остальные источники (MC INS [6], GDT [7] и на базе токамака с  $Q \sim 3$  [8]), несмотря на их явные технические преимущества как по спектру нейтронов, так и по полезному объёму для испытываемых образцов, сегодняшним руководством термоядерных программ не рассматриваются в качестве серьёзного конкурента IFMIF, хотя и не отрицается необходимость их проработки.

Поскольку создание нейтронных источников затягивается, то в ближайшее время будут востребованы работы по изучению фундаментальных процессов взаимодействия водорода и гелия с КМ. Актуальными окажутся работы с применением «третиевого трюка» для насыщения КМ гелием (см., например, [12]).

Еще одним вопросом, разрабатываемым в рамках тематики, является вопрос комплексного использования лития в термоядерном реакторе и, в частности, его использования в качестве материала, контактирующего с плазмой [13]. Эта проблема, кроме прочего, требует экспериментального исследования и осмысления закономерностей взаимодействия плазмообразующих газов с литием в условиях токамака. Литий активно поглощает изотопы водорода, кислород, СО, СО<sub>2</sub>, пары воды и другие газы вакуумной среды [14—17]. Инертные газы, в том числе и гелий, в жидком литии растворяются слабо [16]. Имеется немного экспериментальных исследований взаимодействия ионов водорода (его изотопов) и гелия различных энергий с литием. Основным выводом этих исследований явилось подтверждение поглощения жидким литием ионов водорода, кислорода и слабое его взаимодействие с ионами гелия.

Таким образом, одним из направлений решения проблемы первой стенки термоядерных реакторов является создание и использования литиевых капиллярно-пористых систем. В таких системах основой служит металлическая сетка из проволочек микронного размера, пропитанная литием.

Создание топливного цикла термоядерного реактора в первую очередь связано со специфическими особенностями работы с тритием и, в первую очередь, с безопасностью и предотвращением утечек трития в атмосферу, т.е. с беспрецедентно высокой степенью утилизации трития и обеспечения безопасности работы с ним. Важность этого утверждения становится понятной, если учесть, что для производства электрической энергии 1 ГВт/год требуется 170 кг трития [18]. Во второй половине XXI века по самым скромным подсчётам потребность человечества в электроэнергии составит более 2000 ГВт/год. Если ориентироваться на получение этой энергии в термоядерных реакторах в реакции  $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ , то потребуется сжигать  $3,4 \cdot 10^5$  кг трития в год, т.е. в сто тысяч раз больше, чем существующее количество в литосфере Земли.

Решение вопроса надёжности и безопасности ТЯР потребует принципиально нового подхода к созданию топливного цикла, обеспечивающего нахождение в нём как можно меньшего количества трития. В первую очередь, окажутся востребованными технологии короткоциклового очистки дейтерий-третиевого топлива от гелия и других примесей [19].

В рамках программы ИТЭР ведущей организацией по топливному циклу является Тритиевая лаборатория Карлсруе (ТЛК), Германия. В случае принятия отечественной программы создания термоядерного реактора (демонстрационного либо промышленного) работы по созданию топливного цикла таких реакторов необходимо начать незамедлительно. В рамках Росатома в качестве основного исполнителя может быть рекомендован ФГУП «РФЯЦ—ВНИИЭФ», естественно в связке с ведущими научными организациями России по данному направлению.

## СОЗДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ИНФРАСТРУКТУРЫ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Ключевыми проблемами данного направления являются массовое производство водорода и его безопасное хранение и транспортировка, особенно в случае использования на транспортных средствах.

В настоящее время существует множество способов получения водорода, себестоимость получения водорода большинства из них оказывается достаточно высокой, самым эффективным и дешёвым способом в настоящее время считается метод паровой конверсии метана. Но этот способ малопригоден в случае массового использования водорода на транспорте, поскольку источником для него служит природный газ, запасы которого ограничены. Нарботка водорода путём электролиза воды в настоящее время, с учетом цен на энергоносители, экономически невыгодна, однако в случае резкой потребности в водороде будет применена. Такой способ получения водорода целесообразен либо при использовании провальных режимов в работе электростанций, особенно атомных, либо в случае избытка установленной мощности станции. Поэтому разработка дешёвой технологии получения водорода теплотехническими, каталитическими или другими методами является приоритетной в данном направлении.

Следующим по перечислению, но не по важности приоритетом будет создание средств безопасного хранения водорода на борту транспортного средства. В настоящее время основными подходами в этом направлении являются криогенное хранение, хранение водорода в сжатом виде, хранение водорода в химически или физически связанном состоянии (химическая или физическая адсорбция, гидриды). Хранение водорода в сжиженном состоянии или в баллонах высокого давления уже применяется, но имеет недостатки: необходимость затрат энергии на поддержание низкой температуры, взрывоопасность в случае аварий. Наиболее перспективными на сегодня считаются металлгидридные системы. Работы в этом направлении в ближайшее время будут интенсивно развиваться. Задача, поставленная Департаментом энергетики США, — создать металлгидридную систему с ёмкостью 7% весовых по водороду. Проблемой здесь является поиск, выбор и модификация гидридов металлов, а также разработка промышленной технологии их получения. Существующие перспективные гидриды алюминия, магния, ванадия, титана обладают своими специфическими недостатками. В частности, условия получения гидрида алюминия исключают его получение на борту автомобиля при заправке на топливной станции, хотя он имеет самый высокий весовой процент по водороду (>10%). В настоящее время ведутся работы по получению и использованию интерметаллических гидридов на основе титана (в частности, рассматривается гидрид  $(\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1})_{1,1}\text{CrMn}$ , обладающий ёмкостью по водороду в 2,2% и достаточно приемлемыми характеристиками: энтальпией гидридообразования; скоростями сорбции, десорбции; приемлемыми равновесными давлениями), ванадия и магния. Одним из направлений является также разработка углеродных наноматериалов для хранения водорода и метана (метан может использоваться как промежуточное звено при переходе автотранспорта на водород). Существующие образцы позволяют иметь ёмкость по водороду порядка 1—1,5% весовых. Достоинством таких материалов является распространённость сырья (углерод), недостатками — невысокий весовой процент ёмкости по водороду и необходимость поддержания температуры в заданном диапазоне для достижения максимальной ёмкости по водороду.

Отдельным вопросом создания систем хранения водорода является разработка промышленных технологий создания порошков металлгидридов и углеродных наноматериалов с заданными свойствами. Также в настоящее время ещё только создаются и отрабатываются прототипы будущих серийных конструкций накопителей водорода для транспортных средств. Не решены вопросы создания всеобъемлющей инфраструктуры для массового использования водорода в технике.

При переходе к массовому использованию водорода в качестве энергоносителя или топлива для автомобиля потребуются дешёвые конструкционные материалы, способные работать в водородосодержащих средах. В настоящее время для этих целей используются дорогостоящие аустенитные стали на никелевой основе или специальные сплавы. Основой для таких материалов могут стать ферритные стали со сложной лигатурой, но малым количеством легирующих элементов.

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ

Исследование кинетики взаимодействия простейших атомных частиц (атомов и молекул водорода) с материалами, в частности с поверхностью материалов, представляет собой сложный многостадийный процесс и имеет важное значение для фундаментальной физико-химии гетерогенных процессов. В этом процессе обычно выделяют физическую и химическую сорбцию водорода на поверхности, десорбцию, диссоциацию молекул на атомы и ассоциацию атомов в молекулы, растворение водорода в объёме, диффузию, захват водорода в физико-химические дефекты структуры (ловушки), гидрирование и дегидрирование. В зависимости от химического состава материала, наличия различных примесей протекание этих явлений очень сильно отличается. Несмотря на большой объём накопленного опыта и знаний о протекании различных физико-химических процессов при взаимодействии изотопов водорода с материалами, остаётся достаточно много неясного и малоизученного, что требует развития экспериментальной базы и методов исследования отдельных процессов, а также требует развития и уточнения теоретических представлений.

Практическим результатом таких фундаментальных исследований, проводимых в настоящее время, является получение новых материалов с заданными свойствами, предсказание количественной и качественной картины поведения материалов в реальных условиях. В частности, желательно добиться увеличения скорости гидрирования-дегидрирования металлических накопителей водорода и, наоборот, снизить скорости абсорбции водорода конструкционными материалами.

Перечень некоторых важных направлений исследований в этой области:

— изучение процессов взаимодействия изотопов водорода с материалами при наличии различных покрытий, окисных слоёв и примесей в приповерхностном объёме. Поиск защитных покрытий для защиты конструкционных материалов от водородной коррозии и технологий их нанесения;

— выбор легирующих элементов и их количеств для получения конструкционных материалов с более высокими характеристиками при работе в водородосодержащих средах, в частности, при наличии радиационного воздействия;

— исследование различных явлений, в частности, явления сверхпроницаемости изотопов водорода, возникающих при специальной обработке приповерхностных слоёв металлов V группы;

— изучение различных гидридообразующих металлов и их сплавов с целью получения эффективных металлгидридных накопителей водорода, которые рассматриваются в качестве материалов для перспективного и безопасного способа хранения водорода на борту транспортных средств. Требуется найти или создать системы «твёрдое тело—водород», обеспечивающие ёмкость по водороду более 7% весовых, с высокой скоростью сорбции и десорбции, обладающих низкой энтальпией образования таких систем, с умеренной рабочей температурой и равновесным давлением;

— исследование углеродных наноструктур и наноматериалов а также, поиск эффективных дешёвых технологий их производства. Углеродные наноматериалы также, как и металлгидриды, рассматриваются в качестве материалов для хранения водорода.

Решение задач выбора и создания конструкционных материалов, обеспечения безопасности обращения с водородом и его изотопами во многих случаях является определяющим для развития всех видов энергетики. В связи с этим особо актуальной необходимо считать задачу сохранения и приумножения научного потенциала, сложившегося к настоящему времени в России. Должны быть разработаны меры по подготовке кадров высшей квалификации в ведущих вузах страны.

Кроме того, руководством соответствующих министерств, ведомств, научных и учебных учреждений должна быть поддержана работа постоянно действующей передвижной летней школы молодых учёных и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» как хорошо зарекомендовавшего себя мероприятия, способствующего привлечению и закреплению молодых талантливых учёных данной области науки.



Аркадий Аркадьевич Юхимчук, нач. отдела, д.техн.н.  
arkad@triton.vniief.ru

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воеводин В.Н.** Конструкционные материалы ядерной энергетики — вызов XXI века. — ВАНТ. Серия Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 2007, № 2, с. 10—22.
2. **Адамов Е.О., Филлин А.И., Орлов В.В.** Развитие ядерной энергетики на базе новых концепций ядерных реакторов и топливного цикла. Доклад подготовлен на базе сообщений, представленных предприятиями России (НИКИЭТ, ФЭИ, ВНИИНМ, НИИАР, ЦНИИ КМ «Прометей») на конференции ICONE-11. Токио, Япония, 20—23 апреля 2003 г.
3. **Кинчин Г.Н., Пиз Р.С.** Смещение атомов в твёрдых телах под действием излучения. — УФН, 1956, т. LX, вып. 4.
4. **Lässer R., Baluc N., Boutard J.-L. et al.** Structural Materials for DEMO: Development, Testing and Modelling. Report on 24th SOFT, Warsaw, Poland, 11—15 September, 2006.
5. **IFMIF** final report. RT/ERG/FUS/96/11. Roma.
6. **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. — Fus. Technol., 2001, vol. 39, p. 198.
7. **Ivanov A.A., Ryutov D.D.** — Nucl. Sci. and Eng., 1990, vol. 106, p. 235.
8. **Abdou M.A. et al.** Requirements and Design Envelope for Volumetric Neutron Source Fusion Facilities for Fusion Nuclear Technology Development. IAEA-CN-60/F-II-6.
9. **Yukhimchuk A.A., Pkaev R.I.** RFNC-VNIIEF experience in development and operation of hydrogen isotopes gas-handling systems for basic research. — Fus. Sci. and Technol., 2008, vol. 54, p. 137—142.
10. **Paul P.H. Wilson.** Neutronic of the IFMIF Neutron Source: Development and Analysis. FZKA 6218, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1999.
11. **Annual Report of the EURATOM/UKAEA Fusion Programme 2005/06.**
12. **Denisov E., Kanashenko S., Causey R. et al.** Effect of radiogenic helium on stainless steel 12Cr18Ni10Ti structural changes and hydrogen sorption. — Fus. Sci. and Technol., 2008, vol. 54, № 2, p. 493—496.
13. **Люблинский И.Е.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2006, вып. 3, с. 3—26.
14. **Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н.** — М.: Атомиздат, 1970.
15. **Ihle H., Wu C.J.** — Nucl. Mater., 1985, vol. 130, p. 454—464.
16. **Maroni V.A., Cairns E. J., Cafasso F.** Rep. ANL-8001, 1973.
17. **Фазекас Е.** Поглощение газов жидкими сплавами щелочноземельных и щелочных металлов и применение его для получения низких давлений. — В кн.: Сорбционные процессы в вакууме. Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1966, с. 284—289.
18. **Пономарев Л.И.** Синтез и деление ядер, как основа будущей энергетики. — В сб.: Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-04. Сборник докладов Второго международного семинара. Саров. РФЯЦ—ВНИИЭФ, 2005.
19. **Лившиц А.И. и др.** Сверхпроницаемость водорода в металлах V группы — применение для откачки и рециркуляции топливной смеси в термоядерных реакторах. — Там же.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2009 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 49—55.