

# ВНИИНМ им. А. А. Бочвара: в фокусе наших работ – инновационные материалы и технологии для обороны и атомной энергетики

А.С. Аникин

АО «ВНИИНМ» им. А. А. Бочвара (в прошлом известный как НИИ-9) создавался как научный и технологический центр для решения проблем атомной энергетики. С самого основания в его стенах проводили научные исследования по изучению физико-химических свойств сверхтяжелого изотопа водорода – трития. Коллективом научно-исследовательского отделения разработки оборудования и технологий специальных неядерных материалов и изотопной продукции этого института в соавторстве были созданы все советские, а позднее российские тритиевые технологии – от наработки трития реакторным путем (из изотопа лития-6), очистки и концентрирования этого важнейшего компонента термоядерного синтеза до дезактивации материалов и узлов технологических установок, загрязненных этим изотопом водорода (детритизации). И сегодня в работе этого отделения тритий – один из самых важных элементов для разработки современных высокотехнологичных комплексов для различных областей науки и производства. О задачах, стоящих перед самым молодым в АО «ВНИИНМ» коллективом, о новейших разработках и оборудовании, а также о перспективах развития читайте в нашем репортаже из его лабораторий и с производственных площадок.

## Задачи исследований и методы их решения

Радиоактивный изотоп водорода – тритий – это источник «мягкого» бета-излучения с периодом полураспада 12,3 года, который имеет широкую область применения. Вместе с другим изотопом водорода – дейтерием – тритий используется в качестве топлива в реакторах управляемого термоядерного синтеза. Пока сконструированы и проходят испытания только опытные образцы таких реакторов, но ученые надеются к середине 21 века пустить в эксплуатацию промышленный образец.

Все химические соединения трития по своим свойствам близки аналогичным соединениям обычного водорода, протия, поэтому в материалах они легко замещаются один на другой. Это дает возможность использовать тритий в качестве радиоактивной

метки, например, при исследовании процессов распределения, перемещения водородных соединений, например воды, в различных природных объектах, в том числе и биологических. Этот метод основан еще на том, что, благодаря радиоактивности трития, разработаны чрезвычайно чувствительные способы его обнаружения и измерения.

Сегодня АО «ВНИИНМ» – это базовая организация Госкорпорации «Росатом» по проблемам материаловедения и технологий ядерного топливного цикла для всех видов реакторов. Ввиду чрезвычайной важности этих научно-исследовательских работ для обороноспособности страны и для атомной энергетики, ученым этого высокотехнологичного института сегодня доступно самое современное лабораторное и контрольно-измерительное оборудование ведущих мировых производителей из США, Германии, Великобритании и др.

С помощью высокоточных и высокочувствительных приборов в отделе изотопов и изотопной продукции всесторонне исследуются и сравниваются показатели распределения трития в различных конструкционных материалах, которые планируется применять в активной зоне реакторов управляемого термоядерного синтеза. Цель этих исследований – дать обоснование целесообразности использования тех или иных материалов в реакторах такого типа. Конечно, эти методики применяются не только в подборе материалов для будущего термоядерного реактора, но и для модернизации действующих атомных реакторов.

Для измерения количества трития и его распределения в различных материалах в отделе используются четыре метода: радиолюминография (существенно модернизированный метод автографии), жидкостной сцинтилляции, метод, основанный на регистрации тормозного рентгеновского излучения, а также радиометрические методы.

Радиолюминография – метод анализа скрытого изображения, образовавшегося на покрытой люминофором пластине под действием радиоактивного излучения трития, находящегося в поверхностном слое исследуемого образца, при контакте его с пластиной. Скрытое изображение выявляют с помощью специального лазерного сканера и затем анализируют на контрастную неоднородность с помощью специальной программы. Метод радиолюминографии служит для исследования распределения и определения поверхностной активности трития в сплавах металлов, в конструкционных материалах. Сравнивая исследуемые образцы по этому показателю, а также по тому, где накапливается и как распределяется в них тритий, научные сотрудники ВНИИНМ делают выводы о свойствах и поведении тех или иных материалов под воздействием трития. Полученные знания в конечном итоге способствуют повышению безопасности ядерных реакторов.

В распоряжении ученых отдела изотопов и изотопной продукции ВНИИНМ есть два специальных лазерных сканера. Разрешающая способность более современного прибора составляет 10 мкм, что соответствует самому высокому уровню для приборов этого класса в мире.

Метод жидкостной сцинтилляции основан на свойстве некоторых веществ под действием радиоактивного излучения светиться. Растворяя эти вещества вместе с тритием в специальном растворителе, получают жидкостной сцинтилляционный детектор (сцинтиллятор). С помощью таких сцинтилляторов можно определять с хорошей точностью

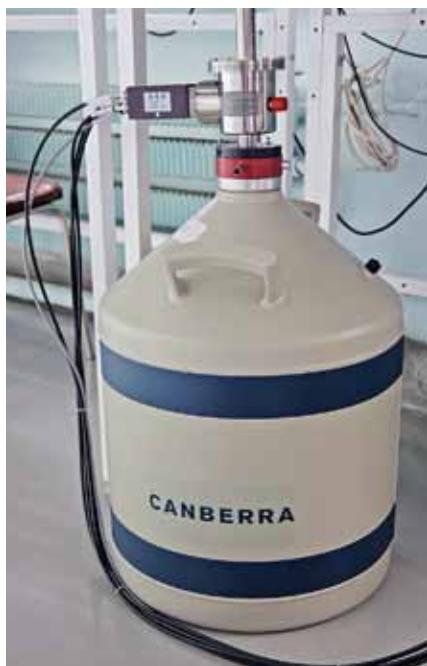
даже незначительные количества трития, приближающиеся к природному фону.

Порядок проведения исследования следующий: пробу тритий-содержащей жидкости, например тритий-содержащей воды, смешивают со сцинтиллятором, он трансформирует бета-излучение трития в кванты света оптического диапазона, которые с помощью фотоумножителя преобразуются в электрический сигнал. Интенсивность сигнала в широких пределах пропорциональна количеству трития в пробе.

В декабре 2019 года в отделе изотопов и изотопной продукции появился сцинтилляционный счетчик производства США. Метод жидкостной сцинтилляции известен уже около полувека, с тех пор сменилось несколько поколений такой измерительной техники. Новый детектор в отделе изотопов и изотопной продукции позволяет загружать и одновременно анализировать большое количество проб. При этом он не просто показывает активность каждой пробы, а работает как спектрометр – выдает ее энергетический спектр. Это создает перспективу использования прибора не только для измерения трития, но и для измерения других радиоактивных изотопов или их смесей. Спектрометрический радиометр способен детектировать альфа- и бета-излучающие радионуклиды в диапазоне энергий от 0 до 2 МэВ. Достаточно просто запрограммировать количество измерений, и прибор в автоматическом режиме начинает их проводить, а потом сохранит все результаты.



Ведущий инженер отдела Наталья Евгеньевна Забирова



Сверхнизкоэнергетический гамма-спектрометр с германиевым детектором

При движении бета-частиц трития в любой среде, в результате их торможения и рассеяния возникает так называемое тормозное рентгеновское излучение, обладающее значительно большей проникающей способностью, чем бета-частицы. Используя специальные ионизационные счетчики, чувствительные к тормозному рентгеновскому излучению, можно обнаруживать тритий в глубине материала.

С целью определения интегрального содержания трития в образцах без их разрушения или термического извлечения трития в середине 2020 года в распоряжении отделения появился двухканальный сверхнизкоэнергетический гамма-спектрометр производства США. Прибор оснащен германиевым и кремне-литиевым детекторами, которые работают в области энергий от 300 эВ до 300 кэВ. Это современное, передовое оборудование, которое не имеет аналогов по возможностям работы в области низких энергий с рекордной разрешающей способностью. Кроме того, с помощью спектрометра можно детектировать не только тритий, но и все радионуклиды, генерирующие рентгеновское или гамма-излучение.

Что касается радиометрических методов, то они основаны на измерении ионизационного тока, возникающего вследствие взаимодействия бета-частиц трития с молекулами воздуха или других газовых смесей. Еще во времена СССР во ВНИИИМ были разработаны ионизационные камеры для определения количества трития и организовано их производство. В распоряжении научных сотрудников отдела изотопов и изотопной продукции имеются ионизационные камеры для измерений трития в газовой среде и в твердом агрегатном состоянии. Все оборудование собственного производства.

## Лабораторные вакуумные установки

В научно-исследовательском отделе нет одной специальной комнаты для проведения всех необходимых измерений. Таких комнат несколько. В одних размещены отдельно стоящие измерительные приборы, в других – герметичные вакуумные установки, представляющие собой, можно сказать, полупроизводственные цехи, оборудованные приборами контроля и системами очистки воздуха помещений и боксов, в соответствии с требованиями радиационного контроля и техники безопасности при работе с большими количествами газообразного трития.

Так, в одном из таких помещений находится вакуумная установка, которая позволяет проводить многодневные эксперименты по изучению



Начальник научно-исследовательского отдела разработки технологии и оборудования для получения изотопов и изотопной продукции Александр Сергеевич Аникин. Жидкостной альфа-бета-спектрометр (сцинтиляционный счетчик)



Одно из помещений отдела, оборудованных по первому классу, с трехзональной планировкой

взаимодействия конструкционных материалов с тритием при различных температурах и давлениях. Установка полностью герметична, а значит, при работе на ней можно не опасаться попадания трития в окружающую среду.

Установка спроектирована таким образом, что гибко настраивается под задачи исследователей, трансформируясь под конкретный проект. Помимо вакуумной системы в ней есть распределительная гребенка со всеми необходимыми контроллерами и датчиками, а также квадрупольный масс-спектрометр производства Германии. Остальное лабораторное оборудование добавляется в установку при необходимости. Поскольку масс-спектрометр подключен к установке, научные сотрудники могут в режиме реального времени отбирать пробы и проводить химический анализ ее атмосферы.

В помещении, где находится установка, трехзональная планировка. Самая «грязная» зона – герметичный бокс – полностью изолирована от окружающей среды. Здесь располагается вакуумная газовая система, которая не сообщается с окружающим миром. Какие бы научные эксперименты в ней не проводили, будь то насыщение различных материалов тритием или конверсия этого радиоизотопа водорода из одного агрегатного состояния в другое, все выделяемые при этом газообразные вещества проходят через систему очистки. Она практически исключает попадание трития в атмосферу рабочих помещений. В двух других зонах допустимо присутствие людей. В ремзоне сотрудники могут задержаться на не очень продолжительное время. А операторская, в которой можно находиться постоянно, – абсолютно «чистая». Состояние атмосферы в ремзоне и операторской отслеживается посредством точек

забора воздуха, расположенных в этих зонах лаборатории.

Уровень загрязненности воздуха отражает световая индикация. Если она светится зеленым, в лаборатории можно работать, желтый свет говорит о том, что в помещении среднее допустимое загрязнение и указывает на необходимость искать его источник. Красный индикатор сигнализирует о том, что люди должны покинуть помещение.

Таких вакуумных установок в распоряжении научных сотрудников отдела изотопов и изотопной продукции несколько. Есть более современная автоматизированная установка с гелевым течеискателем, сварной гребенкой и одним из лучших в мире вакуумных насосов немецкого производства. В ней исследователи изучают все диффузионные характеристики водорода: проницаемость, растворимость, коэффициенты диффузии. Отдельную герметичную установку используют для вакуумной пайки. Она полностью автоматизирована: управление и файловые записи происходят с помощью специального программного обеспечения. Для пайки предназначено специальное устройство, размещенное внутри аргонового бокса с контролируемой атмосферой. Компоненты изделия фиксируются в держателях, в шкафу управления задается нагрев, при достижении нужной температуры отдельные элементы приводят в соприкосновение.



Узел вакуумной пайки

## Заказчики и проекты

У научно-исследовательского отдела разработки технологии и оборудования для получения изотопов и изотопной продукции есть совместные работы в интересах института, но, в основном, он работает для предприятий и организаций атомной отрасли. Бывают у нас и заказчики вне контура ГК.

В конце 2019 года дан старт проекту создания первого в России жидкосолевого реактора, в котором ВНИИНМ им. А. А. Бочвара отвечает за создание топливного цикла ЖСР: изготовление, переработку топлива и обращение с радиоактивными отходами. Научно-исследовательское отделение специальных неядерных материалов в целом и его отдел изотопов и изотопной продукции в частности отвечают за тритиевую часть этой задачи. Как тритий будет образовываться в жидкосолевом реакторе? В каких химических формах существовать? По каким каналам и куда он будет идти? Как его лучше отводить и очищать? Таков далеко не полный перечень вопросов, на которые ученым предстоит дать ответ.

Еще одно, не менее значимое направление исследований, которое ведет отдел изотопов и изотопной продукции ВНИИНМ, – моделирование поведения трития в реакторе на быстрых нейтронах – БРЕСТ-300. Казалось бы, задачи похожи, однако этот прорывной проект в области ядерной энергетики предусматривает разработку реактора нового поколения из других конструкционных материалов, в котором иначе организована активная зона.

Оба направления исследований можно назвать перспективными: запуск жидкосолевого реактора запланирован на 2031 год, а реактора БРЕСТ-300 – на 2026 год. А вот третье направление научных изысканий – создание источника питания на основе трития – это самое что ни на есть настоящее. Научные сотрудники отдела изотопов и изотопной продукции разработали технологию изготовления бетавольтаических источников, провели сборку образца изделия и его вакуумную пайку.

Пока сложно оценить срок службы тритиевой батареи. В паспортных данных полупроводников, которые в ней используются, называется срок 8–10 лет. Однако не исключено, что она может проработать в два раза дольше. Когда эти полупроводники используются на свету для преобразования солнечного света в электрический ток – это одно, а когда на них воздействует только бета-излучение трития и никаких других факторов нет – это совсем другое.

Глобальный производитель таких источников питания, лидирующий в этом сегменте рынка, американская компания CityLabs заявляет, что тритиевые батареи ее производства служат 20 лет и более. При этом, если верить данным из их патентов, мощность используемых источников бета-излучения в 2–2,5 раза меньше мощности тритиевых источников, которые применяются в российском аналоге.

Основные сферы применения тритиевых батареи – там, где нужен стабильный маломощный источник питания. Помимо космических аппаратов, они будут полезны в авиа- и ракетостроении.

Главное конкурентное преимущество тритиевых батареи по сравнению с химическими заключается в их большой удельной электрической емкости, а также устойчивости к большим перепадам температур. Выходу трития из источника будут способствовать только очень высокие температуры до нескольких сотен градусов. А особенность полупроводниковых преобразователей заключается в том, что, в отличие от химических, при низких температурах у них КПД преобразования даже увеличивается. Поэтому при отрицательных температурах эти батарейки будут себя достаточно уверенно чувствовать.

Полупроводниковая промышленность сегодня шагает семимильными шагами, и КПД преобразования бета-излучения полупроводников постоянно увеличивается. Так что после появления полупроводников с коэффициентом полезного действия 15% и выше, возможно, у игроков рынка литий-ионных элементов появится повод для беспокойства.

## Задумки на будущее

Помимо этого, сегодня отдел изотопов и изотопной продукции ВНИИНМ участвует в разработке изотопных масс-спектрометров, разрабатывает инновационные технологические подходы к разделению изотопов лития, бора, азота и других легких элементов. Специалистами отделения был инициирован проект по наработке азота-15 для атомных реакторов на быстрых нейтронах. В отличие от природного, азот-15 не поглощает нейтроны, не переходит в радиоактивный изотоп углерод-14 и позволяет снизить потери нейтронов в активной зоне реактора. Это экологично и, к тому же, с экономической точки зрения очень выгодно.

Потенциально интересным может быть использование карты распределения дейтерия по земному шару для выявления контрафактной продукции.



Вакуумплотная берилиевая фольга и окна рентгеновской аппаратуры

В зависимости от того, в каком уголке планеты выращена сельскохозяйственная продукция, с помощью карты можно понять, сколько дейтерия в ней должно быть. А потом достаточно взять очень небольшую пробу, проанализировать состав и увидеть, действительно ли эти фрукты или овощи выращены в том месте, которое заявлено в документации.

И, конечно же, по-прежнему в центре внимания ученых научно-исследовательского отделения специальных неядерных материалов и изотопной продукции – разработка тритиевых технологий для управляемого термоядерного синтеза. В связи с запуском новых программ развития атомной и термоядерной энергетики в России и в мире это направление работ стало еще актуальным в наше время.

Международный термоядерный реактор ИТЭР, который сейчас создается во Франции, и отечественные реакторы требуют разработки новых подходов к решению проблемы тритиевой безопасности.

Заметим, что свой вклад в этот масштабный проект уже внесли ученые ВНИИНМ.

Для облицовки первой стенки разрядной камеры этого реактора Международная организация ИТЭР разрешила использование разработанного сотрудниками научно-исследовательского отделения ВНИИНМ сорта берилия ТГП-56ПС. Под руководством

и при непосредственном участии ученых в Саратове на ФГУП «Базальт» воссоздано промышленное производство этого сорта высокочистого берилия.

Исторически ВНИИНМ участвовал в разработке практических всех отечественных технологий берилиевых материалов. В советский период под руководством его специалистов на площадке УМЗ разработано и запущено в производство несколько десятков новых сортов берилия.

Заслуги ученых ВНИИНМ в области технологии металлического берилия в советское время были связаны с разработкой специзделий, отражателей и замедлителей высокоеффективных и компактных транспортных реакторов космического назначения и для ВМФ, а также для исследовательских реакторов. Здесь же были разработаны новые сорта берилия для космических зеркал, а также технология материала для берилиевых тормозных дисков космического челнока «Буран».

Сегодня в научно-исследовательском отделении специальных неядерных материалов и изотопной продукции АО «ВНИИНМ» развивается уникальная технология с использованием гидрида берилия.

На основе этого материала в отделении производятся рентгенооптические устройства различного назначения, которые востребованы у нас и за рубежом в современных синхротронных центрах. На производственной площадке отделения создан опытный участок, на котором успешно производят вакуумплотную берилиевую фольгу и окна рентгеновской аппаратуры.



Коллектив опытного участка по производству продукции из берилия