

**Справка редакции.** 22 июня 2010 года ПКК ОИЯИ по физике частиц одобрил проект «Исследование глубокоподкритических электроядерных систем и возможностей их применения для производства энергии и трансмутации РАО» (условное обозначение «Энергия и трансмутация РАО») с первым приоритетом исполнения.

Этот проект нацелен на комплексное исследование возможностей применения принципиально новой схемы электроядерного метода, основанной на ядерных релятивистских технологиях (ЯРТ). Схема ЯРТ предусматривает формирование предельно жесткого нейтронного спектра в объеме глубокоподкритической активной зоны (АЗ) из природного (обедненного) урана или тория, размеры которой обеспечивают минимальную утечку нейтронов (квазисконечная АЗ). Для получения максимальной энергоэффективности в схеме ЯРТ, в частности, предусматривается повышение энергии пучка релятивистских частиц с традиционной для «классических» электроядерных систем энергии 1 ГэВ до уровня примерно 10 ГэВ.

Важной особенностью схемы ЯРТ является то, что с точки зрения физики процессов, протекающих в активной зоне ЯРТ-реактора, возможно и даже экономически выгодно использовать отработанное ядерное топливо (ОЯТ) в составе топливной композиции. При этом не требуется традиционной предварительной радиохимической переработки и выделения ОЯТ, долгоживущих осколков деления и минорных актинидов.

Результаты первых экспериментов, проведенных в ОИЯИ по инициативе ЦФТП «Атомэнергомаш» совместно с белорусскими коллегами, указывают на перспективность основных принципов схемы ЯРТ, в частности на двукратный рост коэффициента усиления мощности пучка дейtronов, облучающих массивную (315 кг) урановую мишень, при увеличении энергии пучка от 1 до 4 ГэВ.

Проект реализуется в рамках большой международной коллаборации.

Отметим своего рода уникальность команды проекта. Помимо 30 участников экспериментов из 14 организаций девяти стран (Россия, Беларусь, Украина, Молдова, Болгария, Германия, Греция, Польша, Чехия), были задействованы учёные и специалисты четырех основных лабораторий ОИЯИ (ЛФВЭ,

## 43-й сеанс Нуклотрона: эксперименты на установке «Квинта»

Говорят, если хочешь насмешить бога – поделись с ним своими планами. Именно эта фраза была лейтмотивом для многих скептиков, комментирующих надежды и усилия нашей многонациональной команды при подготовке к первым экспериментам в рамках проекта «Энергия и трансмутация РАО» на 43-м сеансе Нуклотрона.

ЛНФ, ЛЯП, ЛИТ), а также ОРДВ, ОРБ и целый ряд инфраструктурных подразделений Института. Именно тесное, командное взаимодействие участников проекта, а также самоотверженная работа коллектива Нуклотрона и обеспечили возможность выполнения достаточно амбициозной научной программы экспериментов на установке «Квinta». По ряду причин на сеанс не смогли прибыть физики ФЭИ (Обнинск), ПИЯФ (Гатчина), ИФВЭ (Протвино), Австралии, Сербии, Монголии и Казахстана, но их интерес и поддержку мы ощущали постоянно, общаясь и обмениваясь текущими результатами по электронной почте.

Главная задача программы экспериментов на установке «Квinta» связана с изучением зависимости от энергии дейtronов коэффициента усиления мощности пучка, пространственно-энергетического распределения нейтронов, количества делений и наработки плутония, а также анизотропии спектров и множественности нейтронов утечки в урановой мишени массой примерно 500 кг. Модернизированная к мартовскому сеансу урановая мишень установки «Квinta» моделирует центральную зону будущей



Идет совещание коллаборации – обсуждаются планы предстоящих измерений.

квазисконечной урановой мишени массой около 21 т, которая, в свою очередь, должна стать полномасштабной ядерно-физической моделью активной зоны ЯРТ-реактора. Сам процесс сборки секций новой 500-килограммовой мишени проходил в полном соответствии с Правилами обращения с ядерными материалами на площадях ОРДВ ОИЯИ под руководством Б. Шестакова.

Другой важной задачей стало получение надежных экспериментальных данных для глубокой коррекции физических моделей и транспортных кодов. Для демонстрации важности этой задачи уместно здесь привести цитату из известной монографии В. Баращенко и В. Тонеева (1972): «Поскольку сейчас нет последовательной теории ядерных взаимодействий, а есть лишь набор моделей, пригодных для описания отдельных сторон явления, очень важно давать себе отчет в том, какие заключения и факты являются безусловным следствием опыта, а какие имеют теоретическое происхождение». К сожалению, в процессе предшествующих работ стало очевидным, что и почти 40 лет спустя существующие



Вид установки «Квinta» на пучке.

# Первые уверенные шаги к технологии ядерной релятивистской энергетики

модели и расчетные программы неадекватно отражают процессы, происходящие в массивных мишениях. Это касается не только мишеней из делящихся материалов, например из урана, но также мишеней из хорошо, казалось бы, изученного свинца. Причем проблемы состоят не только в значительных количественных просчетах, но даже и в качественном описании и предсказании результатов экспериментов.

Проект модернизации установки «Квinta», научная программа и методика экспериментов на установке «Квinta» для 43-го и трех последующих сеансов на Нуклotronе в интересах проекта «Э и Т – РАО» были разработаны командой главных идеологов проекта и схемы ЯРТ из Центра физико-технических проектов (ЦФТП) «Атомэнергомаш» (Москва), возглавляемой В. Чилапом.

Неоценимую роль в системной интеграции усилий ученых и специалистов лабораторий и подразделений ОИЯИ и внешних участников проекта сыграл В. Фурман (ЛНФ). И эта его роль значительно усилилась во время мартовского сеанса. Приезд в Дубну такого большого числа представителей разных стран и институтов – членов коллaborации E&T-RW – надо было использовать максимально эффективно. Поэтому руководство коллaborации приняло решение о проведении в течение сеанса двух рабочих совещаний с привлечением всех заинтересованных специалистов, не являющихся на данный момент непосредственными участниками эксперимента, но интересующихся данной тематикой.



В. Вагнер (Чехия), В. Вестмайер (Германия) и А. Хильманович (Беларусь) у установки «Гамма-3».

И вот здесь В. Фурман, имеющий многолетний опыт проведения различных международных конференций и совещаний, в очередной раз проявил себя как прекрасный организатор и дипломат. На совещаниях коллaborации присутствовали как расчетчики, так и физики-экспериментаторы, методисты, спектрометристы, представители дозиметрических служб и другие специалисты. Широкий спектр научных задач, которые предполагается осуществить в рамках проекта, соответственно очертил и широкий круг обсуждаемых вопросов. И здесь энциклопедичность и системность В. Фурмана оказались очень полезны. Но даже двух общих совещаний не хватило, чтобы решить все поставленные вопросы, поэтому ряд рабочих совещаний был проведен по группам: спектрометрические измерения, мониторирование, расчетно-теоретические работы и т. д.

Большую помощь в подготовке систем измерений к сеансу оказали оценочные расчеты, проведенные А. Роговым (ЛНФ) и А. Войцеховским (Польша).

С 5 по 21 марта в рамках 43-го сеанса Нуклотрона прошел цикл уникальных экспериментов по облучению пучками дейtronов трех энергий (2, 4 и 6 ГэВ) урановой мишени установки «Квinta», открывающий путь к созданию принципиально новой релятивистской ядерной энергетики. Впервые был выведен пучок с энергией дейtronов 6 ГэВ, что обеспечило получение принципиально новых результатов на установке «Квinta», имеющих как сугубо прикладное, так и фундаментальное значение.

Кроме того, в рамках сеанса был выполнен комплексный эксперимент на свинцовово-графитовой мишени «Гамма-3», облученной дейtronами с энергией 2,33 ГэВ. При этом, помимо основной программы по изучению скоростей трансмутации образцов изотопов из состава ОЯТ, был выполнен важ-

ный методический эксперимент по калибровке систем мониторирования пучка. Дело в том, что для этого значения энергии определена единственная экспериментальная точка по сечению взаимодействия дейtronов с алюминием.

Безусловно, проведение такого масштабного комплекса экспериментов стало возможным исключительно благодаря всемерной поддержке руководства ЛФВЭ (В. Кекелидзе, Ю. Потребников, Е. Строковский, Г. Трубников), а также ускорительного отделения ЛФВЭ (А. Бутенко, А. Алфеев, А. Сидорин, В. Волков, В. Мончинский, В. Говоров, В. Карпинский, П. Рукояткин и многие другие).



Л. Заборка (Чехия) и В. Сотников (Украина) возле установки «Квinta».

Программа и методика экспериментов на установке «Квinta» долго и тщательно готовились в тесном взаимодействии со специалистами Нуклотрона. Вот лишь один пример. При каждом облучении установки «Квinta» в течение определенного времени требовался режим с большой скважностью сброса пучка на мишень (от 20 до 60 секунд). В ходе подготовки эксперимента шла плотная работа с ускорительным подразделением для обеспечения необходимого режима. «В лоб» вопрос не решался, поскольку серьезно осложнял работу ряда систем Нуклотрона, однако А. Бутенко сформулировал идею обеспечить нужную скважность с помощью периодического ввода внутренней мишени Нуклотрона в пучок. Отработка методики, разработка программного обеспечения и реализация режима были проведены под руководством и при непосредственном активном участии В. Краснова. В результате просто и оригинально решена задача, обеспечивающая прецизионное измерение временного спектра выхода запаздывающих нейтронов в экспериментах.

(Окончание на 6-й стр.)

# Коллектив и его дело

(Окончание.)

Начало на 4–5-й стр.)

Огромный объем работ по подготовке и проведению комплекса экспериментов выполнил главный координатор проекта М. Кадыков (ЛФВЭ). Он обеспечил оперативное решение и координацию всего комплекса организационных, научно-технических, методических и массы других вопросов, сопутствующих проведению столь масштабного эксперимента. Здесь немаловажной оказалась и высокопрофессиональная работа международного отдела ОИЯИ (А. Карташевенко, Э. Резуник и Н. Зайцева), а также ответственной за МНТС ЛФВЭ И. Шестовой.

Особое внимание во время сеанса было уделено вопросам надежного мониторирования пучка, которое определяет достоверность и абсолютизацию получаемых результатов. Под руководством А. Балдина, с участием Н. Владимиrowой и И. Кудашкина (все ЛФВЭ), а также В. Вестмайера (Германия), была проведена натурная отработка и калибровка прототипа системы онлайн-мониторирования интенсивности и положения пучка на мишени, разработанного к этому сеансу. Кроме того, был задействован целый ряд традиционных систем офлайн-мониторирования, реализуемых представителями немецких (В. Вестмайер), чешских (В. Вагнер), белорусских (А. Потапенко) и украинских (В. Воронко) участников коллaborации.

Надо сказать, что в такой постановке и с таким объемом измерений эксперименты еще нигде не проводились. При этом измерения выходов запаздывающих нейтронов и анизотропии спектров нейтронов утечки из массивной урановой мишени, подготовленные и проведенные командой ЛНФ (Н. Гундорин, Ю. Копач, О. Бадунов), осуществлены впервые в практике исследований в области электроядерной технологии.

Важнейшую роль в получении результатов экспериментов коллaborации играла тщательная подготовка как активационных и трековых детекторов, так и комплекса систем гамма-спектрометрии. Здесь необходимо отметить Н. Владимиrowу (ЛФВЭ) и команду ЛЯП (И. Адам, А. Солнышкин, В. Стегайлов, В. Цупко-Ситников), работа которых и в период подготовки к сеансу, и в процессе измерений обеспечила получение всего комплекса информации о пространственном распределении характеристик процессов, протекающих в объеме массивной урановой мишени.

После каждого облучения и завершения комплекса онлайн-измерений группами ЛНФ (Н. Гундорин, Ю. Копач), ЛФВЭ (А. Балдин, А. Берлёв, В. Краснов и др.), Греции (М. Манолопоулou), ОРДВ (В. Щеголев и др.) в дело вступала многонациональная команда офлайн-измерений. В первую очередь, это активационные измерения, проводимые на обеих площадках ОИЯИ: Н. Владимиrowа и А. Кудашкин (ЛФВЭ), В. Вестмайер (Германия), А. Хильманович, Б.

Марцинкевич, С. Корнеев, А. Потапенко, А. Сафонова (Беларусь), В. Воронко, В. Сотников (Украина), С. Килим, М. Белевич, Е. Стругальска-Гола (Польша), В. Вагнер, О. Свобода, М. Силхопар, Ж. Врзалова, Л. Зaborка (Чехия), П. Жиков (Болгария), – под общим руководством И. Адама и А. Солнышкина (ЛЯП).

Надо сказать, что успех перехода от онлайн- к офлайн-измерениям во многом определялся сотрудниками ОРДВ под руководством Б. Шестакова. Именно они обеспечили своевременную транспортировку трансмутационных образцов, активационных и трековых детекторов после каждого облучения к месту проведения спектрометрических измерений в ЛЯП. При кажущейся простоте проблемы транспортировки, кроме множества согласований изрядно «фонящего» груза, была связана с неопределенностью во времени. Ибо, перифразируя классика, «расписание работы Нуклotronа – это не догма, а руководство к действию!». И это действительно было так – мы почти никогда не знали точного времени окончания каждого облучения. Учитывая, что всего коллaborацией было проведено в этом сеансе 4 облучения на разных энергиях, становится понятным, в какое трудное положение попали наши коллеги из ОРДВ. День, ночь, выходной, праздник – спецмашина ОРДВ, ее водитель П. Соколов и ответственный представитель отдела Н. Калякин должны были быть готовы к выезду. И к чести всего коллектива, ОРДВ со всеми своими задачами справился на «отлично», за что им наша отдельная огромная благодарность.

Отмечу здесь, что масштаб проекта и объем измерений ставят на повестку дня вопрос о создании в ЛФВЭ своего центра гамма-спектрометрии. Вот тогда и не придется ОРДВ совершать подвиги, не будет теряться крайне важная информа-



М. Манолопоулou (Греция)  
настраивает Нэ3-детектор.

ция по короткоживущим изотопам в активационном анализе.

В ходе сеанса установилась слаженная оперативная командная работа с руководителями и сотрудниками ускорительного отделения, непосредственно задействованными в 43-м сеансе. Руководители и персонал дежурных смен управления Нуклotronа всегда шли на встречу нашим потребностям. Команда идеологов проекта из ЦФТП «Атомэнергомаш» (В. Чилап, А. Чиненов, М. Галанин) оперативно корректировала программу и методику проведения экспериментов для получения необходимых экспериментальных данных, исходя из реальных возможностей и потребностей ускорительного отделения. Фактически отделение непосредственно участвовало в экспериментах. Дружная работа в онлайн-режиме с персоналом дежурных смен и обеспечила получение необходимых для выполнения всей программы экспериментальных данных.

Мы с полным пониманием относились к необходимым технологическим перерывам в работе Нуклotronа, зная, что проводится глобальная модернизация и персонал ускорителя делает все возможное для обеспечения его устойчивой работы.

Нам есть с чем сравнивать, и мы с уверенностью можем констатировать, что модернизация Нуклotronа приносит весьма ощутимые плоды.

Участники коллaborации E&T-R&W выражают огромную благодарность всем, кто в сложнейших условиях непрерывной модернизации Нуклотрона-М обеспечил его надежную работу в 43-м сеансе, а также всем сотрудникам ОИЯИ, кто в той или иной степени способствовал успешному проведению наших экспериментов.

Сергей ТЮТЮННИКОВ,  
начальник отделения № 5 ЛФВЭ  
ОИЯИ, руководитель проекта  
«Энергия и трансмутация РАО».