

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

УДК 621.039.5

*О. И. ЯРОШЕВИЧ, И. В. ЖУК, В. Т. КАЗАЗЯН,
И. Е. РУБИН, Л. И. САЛЬНИКОВ, С. Н. СИКОРИН*

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТЯХ ФИЗИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ОБЪЕДИНЕННОМ ИНСТИТУТЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ – СОСНЫ НАН БЕЛАРУСИ

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 25.05.2014)

Введение. Ни одна из современных технических отраслей не развивалась столь стремительно, как наука и техника ядерных реакторов. Всего четыре года прошло со времени обнаружения в 1938 г. О. Ганом и Ф. Штрассманом деления ядер урана до осуществления первой в мире самоподдерживающейся цепной реакции деления ядер урана (1942 г., г. Чикаго, США, Э. Ферми). В 1942–1943 гг. в США в Хэнфорде в рамках программы разработки ядерного оружия созданы первые мощностные графитовые ядерные реакторы на естественном уране; в 1946 г. в СССР в г. Москва пущен первый в Европе ядерный реактор Ф-1, который находится в эксплуатации до настоящего времени (в течение 68 лет), а в 1954 г. в СССР в г. Обнинск создана первая в мире атомная электростанция мощностью 5000 кВт. Со времени ее пуска прошло всего 60 лет и атомная энергетика заняла прочное место в промышленном производстве электроэнергии многих развитых и развивающихся стран. Первые полные монографии по физике ядерных реакторов – публикация Ферми и «Чикагский» эксперимент [1], оригиналы на английском и переводы на русский монографий С. Глестона и М. Эдлунда [2], А. Вейнберга и Е. Вигнера [3], а также советские монографии Г. И. Марчука [4] и С. М. Фейнберга [5] и др. Физика ядерных реакторов выделилась в отдельную область.

Создание нового реактора любого типа и назначения предваряется обширным комплексом научных исследований по физике ядерных реакторов, ионизирующим излучениям, материаловедению, теплофизике, термодинамике, радиационной химии и радиохимии, ядерному приборостроению, теплообменным аппаратам и др. Авторы настоящей статьи (ветераны ОИЭЯИ – Сосны и институтов-предшественников ОИЭЯИ – Сосны со стажем работы 40–55 лет на площадке ОИЭЯИ – Сосны) в соответствии со своей специализацией, а также в связи с 50-летием пуска двух первых в Беларуси ядерных реакторов физической мощности – критических стендов «Роза» (апрель 1964 г.) и «Лилия» (декабрь 1964 г.) [6, 7] сочли целесообразным более или менее детально описать историю развития и основные результаты научных исследований в ОИЭЯИ – Сосны и институтах-предшественниках за период с 1958 по 2014 г. лишь в двух областях науки и техники: физики ядерных реакторов и ионизирующих излучений, включая работы по минимизации последствий катастрофы на ЧАЭС.

История развития научных исследований по физике ядерных реакторов в Беларуси. В 1960 г. по инициативе академика АН БССР А. В. Лыкова на работу в Минск приглашен один из создателей первой в мире АЭС в г. Обнинск, Белоярской АЭС и передвижной АЭС ТЭС-3 лауреат Ленинской премии Андрей Капитонович Красин, который был избран академиком АН БССР и назначен директором отделения атомной энергетике Энергетического института АН БССР (с 1963 г. ИТМО АН БССР). До этого времени с 1958 г. в БССР по инициативе академиков И. В. Курчатова и А. П. Александрова (г. Москва) начаты работы по строительству исследователь-

ского бассейнового реактора ИРТ-2000 тепловой мощностью 2000 кВт [8]. Бассейновые исследовательские реакторы ИРТ создавались также в РСФСР (в г. Москва (ИАЭ и МИФИ), г. Томск), в Грузии и Латвии. В других союзных республиках (Украина, Казахстан, Узбекистан) были построены исследовательские реакторы типа ВВР. Эти работы в БССР возглавил заместитель директора Энергетического института АН БССР В. С. Ермаков. Однако реактор ИРТ-2000 был типовым, разработанным в Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники (НИКИЭТ, г. Москва) под руководством академика АН СССР Н. А. Доллежала и под научным руководством ИАЭ им. И. В. Курчатова (академик А. П. Александров). Поэтому, несмотря на большое значение для белорусской науки строительства и пуска в эксплуатацию реактора ИРТ-2000 [8], годом начала собственных работ в Беларуси по физике реакторов (как части работ по атомной энергетике) следует считать 1960 г. – год переезда в г. Минск А. К. Красина. Физический пуск реактора ИРТ-2000 проведен в апреле 1962 г. (реактор достиг критичности 28 апреля 1962 г.) под научным руководством Ю. Г. Николаева из ИАЭ им. И. В. Курчатова с участием сотрудников института.

Большую помощь на различных этапах создания и физического пуска реактора ИРТ оказали сотрудники ИАЭ им. И. В. Курчатова: Ю. Ф. Чернилин, В. Ф. Красноштанов (перешедший на короткое время на работу в г. Минск – с декабря 1961 г. по июль 1962 г.), П. М. Егоренков, Д. А. Вертоградский и др. Все службы реактора ИРТ: операторов (О. И. Ярошевич), СУЗ (Б. И. Тимчук), механиков (М. Ф. Кохонов), электриков (Г. И. Стрелков), дозиметрии (И. Н. Александровский) были укомплектованы в основном выпускниками белорусских вузов, большинство из которых прошли длительные стажировки на московском реакторе ИРТ ИАЭ им. И. В. Курчатова.

Энергетический пуск реактора ИРТ-2000 проведен уже без участия сотрудников Курчатовского института в октябре – ноябре 1962 г. исключительно силами белорусских специалистов под руководством начальника реактора Г. И. Стрелкова и главного инженера О. И. Ярошевича.

Прекрасно понимая огромное значение высококвалифицированных кадров, имеющих опыт создания ядерных энергетических установок, А. К. Красин пригласил на работу целую плеяду молодых сотрудников (специалистов-реакторщиков) из различных институтов и конструкторских бюро СССР, имевших опыт создания ядерных энергетических установок (В. А. Наумов, Б. А. Литвиненко, В. П. Слизов, В. В. Сапожников, Ю. К. Щекин, В. А. Левадный, Г. А. Носов, Ю. И. Чуркин и др.). Они составили основную группу физиков-реакторщиков в созданном в 1965 г. по инициативе А. К. Красина Институте ядерной энергетики АН БССР (ИЯЭ АН БССР), правопреемником которого является Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси. Приглашались (или трудоустроивались самостоятельно) выпускники-физики из ведущих университетов и институтов СССР: Г. В. Шишкин, В. А. Коньшин, И. Д. Дмитриева, А. П. Семашко, А. И. Зарецкий из Московского и Е. Ш. Суховицкий из Новосибирского госуниверситетов, Б. Г. Лучкин и В. Н. Соловьев из Ленинградского политехнического института и др. Параллельно привлекались лучшие выпускники физического факультета БГУ (кафедра «Ядерная физика и мирное использование ядерной энергии») – Л. П. Рогинец, А. И. Киевицкая, С. Е. Чигринов, Н. М. Груша, А. И. Додь, С. И. Гульник, С. Н. Сикорин, Е. М. Ломоносова, И. Г. Серафимович, И. В. Жук, И. А. Едчик, И. Е. Рубин, Б. И. Попов, А. М. Бондарь, М. М. Жук, Л. И. Сальников, В. А. Брылева, В. В. Скурат, Г. Б. Мороговский, С. Г. Мандик, М. В. Бычков, В. В. Бурнос, А. А. Мазаник, Г. И. Плинов, Р. А. Шатерник, Л. П. Домашенко и др., а также выпускники профильных «реакторных» вузов МИФИ, МЭИ, Уральского политехнического института и др. (В. П. Кашеев, В. Т. Каззян, А. П. Малыхин, И. А. Савушкин, С. А. Полозов, М. Л. Жемжуров, Н. Н. Светлакова и др.). Более подробно описанный выше этап становления ИЯЭ приведен в [9].

Важнейшими задачами ИЯЭ являлись создание расчетной и экспериментальной базы для исследований в области атомной энергетики и использования радиоактивных излучений. В ИЯЭ была создана современная экспериментальная база (установки и методы измерения всех важнейших нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов, накоплены комплекты уранового ядерного топлива с обогащением от 10 до 90% по урану-235), позволяющая проводить исследования по физике ядерных реакторов различных типов и не имеющая аналогов в других союзных республиках, за исключением РСФСР.

Основные результаты научных исследований по физике ядерных реакторов и ионизирующим излучениям в ИЯЭ за период 1960–1991 гг.

1) Размещение в активных зонах реактора ИРТ петлевых каналов, существенно расширяющих экспериментальные возможности реактора путем создания в центре его активной зоны нейтронной «ловушки» с потоком тепловых нейтронов примерно $1 \cdot 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ для размещения петлевых каналов различных типов для проведения исследований по ресурсным испытаниям композиций тепловыделяющих элементов новых типов ядерных реакторов, хемоядерному синтезу и другим направлениям исследований [8, 10, 11].

2) Создание более 10 реакторов физической мощности (критических стендов), на которых были исследованы основные нейтронно-физические характеристики более 50 активных зон (критических сборок) [6, 7]. Критические сборки представляли собой однородные и неоднородные критические системы с твердым и жидким замедлителем нейтронов и без него [12–15], которые позволили создать надежный экспериментальный тест для расчетных методов и математических программ по новым типам реакторов, разрабатываемых в ИЯЭ, и обосновать различные модификации реактора ИРТ [10, 16, 17].

3) Разработка и создание передвижной атомной электростанции (ПАЭС) «Памир-630Д» электрической мощностью 630 кВт и тепловой мощностью 5050 кВт на диссоциирующем теплоносителе на основе N_2O_4 для нужд министерства обороны СССР. Работы по ПАЭС «Памир-630Д» проводились в течение 25 лет (1963 – 1988 гг.) в ИЯЭ АН БССР в широкой кооперации со многими организациями СССР. ПАЭС «Памир-630Д» на полуприцепах Минского автозавода являлась уникальной в мировой ядерной энергетике и первой в мире по нескольким ключевым параметрам: полная автономия (воздушное охлаждение обеспечивалось в широком диапазоне климатических условий); передвижение по автомобильным дорогам с остановленным, но расхолаживаемым реактором; управление на всех режимах работы ПАЭС осуществлялось с помощью ЭВМ (операторы выполняли лишь наблюдательные функции); обеспечение одновременной защиты от непрохождения и ложных аварийных сигналов. Решением министра среднего машиностроения СССР Е. П. Славского было рекомендовано внедрить опыт компьютеризации системы управления ПАЭС «Памир» на все АЭС Советского Союза [18].

Разработка ПАЭС «Памир-630Д» (научным руководителем и главным конструктором которой в разные годы были академик АН БССР А. К. Красин и чл.-кор. АН БССР В. Б. Нестеренко) потребовала создания нескольких уран-гидридциркониевых критических стендов с топливом среднего обогащения (21, 36 и 45% по ^{235}U), проведения обширной программы экспериментов на «холодных» (при температуре окружающей среды в боксе критических стендов [19, 20 и др.]) и «горячих» (при температуре нагрева до 250°C [21]) критических сборках. Разработка завершилась созданием двух опытных образцов, осуществлением физического и энергетического пуска первого опытного образца ПАЭС и проведения на нем испытаний в течение около 3000 ч на различных уровнях мощности, включая номинальную. Экспериментальное обоснование по физике реактора «Памир-630Д» на всех этапах проектирования, измерений на критических сборках, изготовления двух опытных образцов ПАЭС, пуска и испытания первого опытного образца проведено только специалистами ИЯЭ АН БССР (подробнее программы и результаты экспериментальных исследований по физике реактора «Памир-630Д» на всех стадиях создания ПАЭС описаны в [19–24]).

Однако по ряду причин, основными из которых являлась катастрофа на ЧАЭС (ПАЭС «Памир» размещалась на расстоянии 6 км от Минской кольцевой автодороги МКАД) и несоблюдение сроков доводочных испытаний первого опытного образца ПАЭС, решением Государственной комиссии Совмина СССР от 9.02.1988 г. было предписано все испытания на ПАЭС «Памир-630Д» прекратить. В то же время в решении отмечались полученный большой положительный опыт по разработке и наладке ПАЭС и целесообразность его использования при создании передвижных АЭС на других теплоносителях. Ввиду распада СССР эта рекомендация не была реализована.

4) Создание петлевых установок в активной зоне реактора ИРТ-2000 для исследования радиационно-химических процессов:

радиационно-термический крекинг нефти с использованием смешанного n -, γ -излучения;

синтез гидразина из аммиака с использованием энергии осколков деления ядерного топлива; мощность установки до 5 кВт, температура газа 70–500 °С, давление 50 кг/см².

Научные руководители работ по хемоядерному синтезу и радиационным технологиям – В. И. Гольданский, А. К. Красин, Е. А. Жихарев, И. Ф. Осипенко, И. И. Саламатов, Б. Г. Дзантиев. Результаты этих работ использованы при создании в СССР лазеров с ядерной накачкой.

5) Создание пяти быстротепловых реакторов физической мощности (критических стендов) для исследований по физике газоохлаждаемых энергетических реакторов на быстрых нейтронах, разрабатываемых в ИЯЭ АН БССР, и перспективных пароводяных энергетических реакторов повышенной безопасности, разрабатываемых в ИАЭ им. И. В. Курчатова [25–32].

6) Создание уникального реактора физической мощности (критического стенда «Астра» с вращающейся активной зоной, содержащей шариковые микротвэлы) [33, 34].

Основные результаты, полученные в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны в течение 1991–2014 гг.

1) Создание методик и установок для измерения всех основных ядерно-физических характеристик ядерных установок [27, 35–58], включая также период с 1960 по 1990 г.

2) Создание файлов оцененных ядерных данных для делящихся и конструкционных материалов, необходимых для расчетов и проектирования ядерных установок, которые вошли в мировые библиотеки ядерных данных ENDF/B, JENDL, BROND и JET.

3) Создание на основе научной концепции, разработанной сотрудниками ОИЭЯИ – Сосны под руководством С. Е. Чигринова и др. [59], ядерно-физического подкритического комплекса (ЯФПК) «Яліна» (включающего генератор нейтронов НГ-12–1, уран-полиэтиленовую (тепловую) и бустерную (быстротепловую) подкритические сборки и измерительный комплекс) для проведения исследований в областях ядерной и нейтронной физики, кинетики подкритических систем, управляемых внешними источниками нейтронов, физики связанных нейтронных систем и в ряде других задач [60–64]. Эта концепция одобрена специалистами ведущих ядерных центров Европы, США, Японии и других стран, отметивших ее значимость в развитии ядерных технологий будущего.

4) Создание критического стенда «Гиацинт» и комплекса аппаратно-программных средств для проведения экспериментальных исследований реакторных систем различного назначения. Для получения бенчмарк-данных по критичности на этом стенде исследованы высокообогащенные (21, 36 и 90% по урану-235) нейтронные размножающие системы с водяным и гидридциркониевым замедлителями и без них. По техническому заданию ОИЭЯИ – Сосны в ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» Госкорпорации «Росатом» разработано и изготовлено новое низкообогащенное (19,75% по урану-235) ядерное топливо на основе уран-циркониевого карбонитрида, предназначенное для применения в перспективных энергетических и исследовательских ядерных реакторах. С его использованием на стенде выполнены эксперименты на критических сборках с водяным замедлителем. Результаты работ на критическом стенде «Гиацинт», в том числе выполненных совместно с российскими и американскими ядерными центрами, представлены на ряде международных конференций [65–68] (С. Н. Сикорин, С. Г. Мандик, С. А. Полозов и др.).

5) Проведение комплекса работ по проблемам чернобыльского объекта «Укрытие» (расположенного под саркофагом разрушенного 4-го блока ЧАЭС) непосредственно в г. Чернобыль в составе белорусской группы Комплексной международной чернобыльской экспедиции (Г. А. Шароваров, В. В. Скурат, М. Л. Жемжуров, В. Г. Молодых и др.) в период с 1988 по 2000 г. и по прямому хозяйственному договору с МНТЦ «Укрытие». Основные результаты:

разработка концепции и программы научных исследований по преобразованию загрязненных радионуклидами территорий и разрушенного реактора в экологически безопасные системы путем биоочистки почв [69, 70];

разработка первого тома обоснования радиационной и ядерной безопасности объекта «Укрытие» на основе новых данных по радионуклидному балансу [71];

проведение физических расчетов в обоснование выбора состава и конструкции критическихборок для моделирования топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» [72].

6) Проведение обширного комплекса работ на территории Беларуси, связанных с последствиями катастрофы на Чернобыльской АЭС.

К моменту катастрофы в Чернобыле ИЯЭ АН БССР был одной из немногих организаций в Беларуси, имевшей многолетний опыт работ с радиоактивными излучениями и сразу подключившейся к работам по постчернобыльским проблемам, которые продолжают в ОИЭЯИ – Сосны по настоящее время. Общее руководство этими работами в первые годы после катастрофы на ЧАЭС возглавили директор В. Б. Нестеренко и главный инженер М. Ф. Кохонов.

Основные результаты этих работ:

проведение массовых измерений уровней загрязнений «чернобыльскими» радионуклидами проб различных объектов окружающей среды (почва, вода, растительность, продукты питания и др.), доставляемых на площадку ИЯЭ (часто вертолетами) из белорусской части 30-километровой зоны от ЧАЭС и территорий, примыкающих к зоне отчуждения (ответственные исполнители Б. Г. Лучкин, В. П. Миронов, Ю. И. Чуркин, В. П. Кудряшов, Н. Н. Светлакова и др.). Результаты этих работ ежедневно передавались руководству АН БССР и БССР (ЦК КПБ и Совмин БССР) для принятия управленческих решений по чернобыльским проблемам;

разработка методик измерений и создание радио- и спектрометрических установок и установок для радиохимического анализа проб (Ю. И. Чуркин, А. О. Катанаев, Н. Н. Светлакова) для контроля уровней радионуклидных загрязнений окружающей среды при использовании практически всего запаса имевшихся в ИЯЭ сцинтилляционных детекторов большой поверхности, на основе которых были созданы радиометрические установки для контроля содержания γ -излучающих радионуклидов (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Ru и др.) на молоко- и мясоперерабатывающих заводах (А. О. Катанаев и др.). Особо следует отметить решение проблемы контроля загрязненности продуктов питания на колхозных рынках, когда в течение короткого времени необходимо провести контроль тысяч проб продуктов питания. Разработаны радиометрические установки на основе сцинтилляционных датчиков меньшего размера и соответствующая методика измерения, полностью вытеснившие радиометрические установки на основе β -счетчиков с существенно меньшей оперативностью контроля, использовавшихся в первые месяцы после катастрофы на колхозных рынках;

разработка инструментальных экспрессных методов контроля наиболее долгоживущих трансурановых элементов (америций-241, плутоний-238, -239 и -240) в различных объектах окружающей среды и проведения комплекса исследований миграции этих радионуклидов [58, 73, 81].

7) Проведение комплекса исследований радиоэкологических характеристик на территориях конкурентных пунктов и площадок для строительства АЭС в Беларуси. Указанные исследования являются важнейшей составляющей в комплексе изысканий, регламентированных соответствующими нормативными белорусскими документами, а также рекомендательными документами МАГАТЭ. Радиоэкологические исследования проводились в рамках хозяйственных договоров с «Белэнерго», БелНИПИэнергопромом, Минэнерго, Комчернобылем с участием Института радиобиологии НАН Беларуси, радиоэкологических служб республиканских, областных и районных Центров гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья Минздрава РБ и других организаций. Особенно тщательно радиоэкологические исследования были проведены на Краснополянской площадке и в 30-километровой зоне вокруг нее, загрязненной долгоживущими «чернобыльскими» радионуклидами. Основные результаты указанных выше исследований приведены в [82–85].

8) Проведены теоретические исследования по разработке и усовершенствованию методов расчета реакторов с использованием теории диффузии нейтронов: расчетные комплексы Гера и КРАТЕР; методы альbedo и вероятностей прохождения, Монте-Карло; решения кинетического уравнения переноса нейтронов [86, 87 и др.]. Разработаны математические модели и программы расчета сечений взаимодействия нейтронов с делящимися ядрами [88]. Продолжаются теоретические работы по уточнению ядерно-физических констант реакторных материалов в расширенном диапазоне энергий (до 200 МэВ) нейтронов [89].

9) Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009–2010 гг. и на период до 2020 г.

В соответствии с указом Президента Республики Беларусь от 12.11.2007 г. № 565 «О некоторых мерах по строительству атомной электростанции» ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси осуществляет научное сопровождение развития ядерной энергетики в Беларуси. По этому разделу ведутся научные исследования по более чем 10 направлениям [90]. Они охватывают области разработки нормативно-правовой базы развития атомной энергетики, методик и программных модулей, позволяющих проводить нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты реактора ВВЭР-1200 при различных состояниях, методов обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом, методик химической дезактивации оборудования, физической защиты, ведется мониторинг общественного мнения по вопросам развития атомной энергетики в Республике Беларусь.

10) Предложения по новым направлениям поисковых и других возможных видов фундаментальных и прикладных исследований.

ОИЭЯИ – Сосны предлагает разработать научные основы и провести исследования по следующим новым направлениям в областях физики реакторов и ионизирующих излучений, большинство которых обладает высоким уровнем инноваций и элементов know how:

создание устройства и способа аварийной защиты ядерных реакторов, основанных на эффекте разблокировки поглотителей нейтронов с высоким содержанием нейтронно-поглощающих материалов;

разработка способа неразрушающего контроля глубины выгорания урана-235 на АЭС, накопления плутония-239 и несанкционированного извлечения плутония из активной зоны реакторов АЭС;

исследование возможности использования радиоактивного излучения выгоревших тепловыделяющих сборок для создания мощных и экономичных источников гамма-излучения;

проведение комплексного исследования компонент суммарного радиоактивного облучения населения Беларуси от всех природных и техногенных источников ионизирующего излучения в обеспечение Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения РБ».

Международное сотрудничество. Исследования, описанные выше, проводились при участии основных ядерных научных центров СССР, специализирующихся в области физики ядерных реакторов: ИАЭ им. И. В. Курчатова (г. Москва), Института теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), Физико-энергетического института (г. Обнинск), НИИ атомных реакторов (г. Димитровград) и др.

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси и в настоящее время поддерживает тесные научные связи со многими ядерными научными центрами ближнего и дальнего зарубежья. В России – НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва; НИЦ «Институт теоретической и экспериментальной физики», г. Москва, ОАО «НИКИЭТ», г. Москва, ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»», г. Подольск, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна; Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, г. С.-Петербург; НПЦ по радиационной экологии, г. Москва. Кроме того, осуществляется сотрудничество с Институтом гигиены и медицинской экологии АМН Украины; Аргоннской и Айдахской Национальными лабораториями США; Международным исследовательским центром ЦЕРН, г. Женева, Швейцария; коллаборацией 15 стран (Германия, Россия, Индия, Беларусь, Украина, Казахстан и др.) по проекту «Энергия + трансмутация»; Университетом г. Сиднея, Австралия; Шведским управлением по радиационной защите, г. Стокгольм, Швеция и др. ОИЭЯИ – Сосны также участвует в исследованиях по проекту № 541 Международной программы геологической корреляции, курируемой ЮНЕСКО и связанной с исследованиями по проблемам радона в различных странах.

Современное состояние исследований. Ко времени распада СССР в Институте ядерной энергетики АН БССР действовали три реактора физической мощности (критических стенда) и универсальная гамма-установка УГУ-420. В настоящее время в ОИЭЯИ – Сосны имеются следующие ядерные установки и устройства: критические стенды «Гиацинт» и «Кристалл» для исследований по физике различных типов реакторов, подкритический комплекс «Яліна», управляемый генератором нейтронов, гамма-установка УГУ-420 и линейный ускоритель электронов УЭЛВЭ-10-10.

В настоящее время ОИЭЯИ – Сосны является единственным в Беларуси государственным научным учреждением, имеющим многолетний опыт в области проектирования и исследования характеристик реакторных установок различного назначения и единственной в Беларуси организацией, имеющей лицензию на работы в этой области, включая экспертизу документации по первой Белорусской АЭС.

Несмотря на существенное сокращение количества сотрудников после распада СССР из-за прекращения финансирования из бюджета СССР, ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси все еще имеет возможность проведения комплексных фундаментальных и прикладных исследований по атомной энергетике и использованию радиоактивных излучений. Выполняются поисковые исследования по анализу ядерной и радиационной безопасности различных объектов, такие как расчетное обоснование ядерной безопасности хранилища необлученных ядерных материалов «Явар», экспертиза ядерной и радиационной безопасности проекта АЭС-2006, сооружаемой на территории Республики Беларусь, на разных этапах. Начата подготовка к **обязательному** расчетному сопровождению эксплуатации станции, направленному на повышение уровня безопасности, надежности и экономичности Белорусской АЭС. Рассматривается возможность строительства в Республике Беларусь нового многофункционального исследовательского реактора [91], а также разработки совместно с Госкорпорацией «Росатом» передвижной (транспортируемой) атомной станции малой мощности [92–94].

Заключение. Представляется целесообразным ознакомить общественность Беларуси и, прежде всего, научных сотрудников различного профиля (как сторонников, так и противников строительства АЭС в Беларуси) с историей, характером и результатами научных исследований, проведенных в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси и институтах его предшественников в двух обозначенных в названии статьи областях ядерной науки и техники и в некоторых новых направлениях фундаментальных и прикладных исследований в ближайшей перспективе. В разные годы руководство ОИЭЯИ – Сосны и предшествующих институтов осуществляли: А. В. Лыков, А. К. Красин, В. Б. Нестеренко, В. Н. Сорокин, С. Е. Чигринов, Л. И. Сальников, А. А. Михалевич, Г. А. Шароваров, В. В. Скурат, В. И. Кувшинов, А. И. Киевицкая, А. В. Кузьмин (с 2013 г. по настоящее время). Особо хотелось бы отметить постоянное внимание и помощь к работам на площадке – Сосны руководства НАН Беларуси, особенно бывших президентов Академии наук Н. А. Борисевича, Л. М. Сущенко, А. П. Войтовича, М. В. Мясниковича, членов Бюро Президиума академии и академиков-секретарей Отделения физико-технических наук П. А. Витязя, С. А. Астапчика, О. Г. Мартыненко, М. С. Высоцкого и др.

Литература

1. Ферми Э. Ядерная физика. М., 1952.
2. Глестон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов: Перевод с англ. М., 1954. *Glesston S., Edlund M. The Elements of Nuclear Reactor Theory. Toronto – New York – London, 1952.*
3. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов: Перевод с англ. под ред. Я. В. Шевелева, М., 1961. *Weinberg A., Wigner E. The Physical Theory of Neutron Chain Reactors. Chicago, 1959.*
4. Марчук Г. И. Методы расчета ядерных реакторов. М., 1961.
5. Фейнберг С. М., Шихов С. Б., Троянский В. Б. Теория ядерных реакторов. М., 1978.
6. Красин А. К., Нестеренко В. Б., Стрелков Г. И. и др. Наука БССР за 50 лет. Мн., 1968.
7. Красин А. К., Ярошевич О. И. // Атомная энергия. 1966. Т. 20. С. 61–62.
8. Красин А. К., Наумов В. А., Ярошевич О. И. и др. // Proc. of the Third Intern. Conf. Geneva, 1964. Vol. 7. United Nations. New York, 1965. P. 148–157.
9. Гребеньков Ж. А., Михалевич А. А., Шароваров Г. А., Ярошевич О. И. История атомной энергетики Советского Союза и России / Под ред. В. А. Сидоренко. РНЦ «Курчатовский институт». М., 2004. Вып. 5. С. 121–153.
10. Красин А. К., Кохонов М. Ф., Ярошевич О. И. и др. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1969. № 1. С. 29–34.
11. Красин А. К., Стрелков Г. И., Сокольчик В. А. и др. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1971. № 2. С. 7–15.
12. Красин А. К., Наумов В. А., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1967. № 1. С. 9–17.
13. Левадный В. А., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1970. № 2. С. 16–18.
14. Малыхин А. П., Чуркин Ю. И., Жук И. В., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1972. № 2. С. 6.
15. Наумов В. А., Чуркин Ю. И. и др. // Матер. III Всесоюз. конф. по диссоциирующим газам. Минск, январь 1973 г. Мн., 1973.
16. Ярошевич О. И., Сокольчик В. А., Борисевич В. А. и др. // Матер. III Междунар. совещ. по физике и технике исследовательских реакторов. Прага (ЧССР). Докл. Р/II. 1963.

17. Красин А. К., Левадный В. А., Ярошевич О. И. и др. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1967. № 2. С. 6.
18. Шароваров Г. А. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2011. № 4. С. 15–17.
19. Гульняк С. И., Сикорин С. Н., Ярошевич О. И. и др. // Сб. докл. научного семинара / Под. ред. А. А. Михалевича, С. Е. Чигринова. Мн., 1996. С. 34–39.
20. Malykhin A. P., Sikorin S. N., Yaroshevich O. I., Levadnyi V. A. // A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics SMORN VII, 19–23 June, 1995. Avignon, France: Proceedings. Paris, 1996. Vol. 2. P. 48–56.
21. Edchik I., Sapoznikov V., Yaroshevich O. et al. // Proceedings of 3th Intern. Yugoslav Nuclear Society Conference. Belgrade, 2001. P. 739–741.
22. Сапожников В. В., Сикорин С. Н., Ярошевич О. И. и др. // Сб. тезисов докладов X ежегодн. конф. ядерного общества России, 22 июня – 2 июля 1999 г., Обнинск. Обнинск, 1999. С. 168–170.
23. Михалевич А. А. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 1. С. 75–81.
24. Гребеньков Ж. А., Казазян В. Т., Малыхин А. П. и др. Энциклопедия машиностроения. М., 1999.
25. Бычков М. В., Малыхин А. П., Ярошевич О. И. и др. // Атомная энергия. 1974. Т. 34. С. 337.
26. Наумов В. А., Чуркин Ю. А., Серафимович И. Г., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1982. № 1. С. 3–8.
27. Кухаев А. И., Чуркин Ю. А., Жук И. В. и др. // Матер. III Всесоюз. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М., 1983. Т. 1. С. 182–187.
28. Бычков М. В., Малыхин А. П., Ярошевич О. И. и др. // Матер. 3-го Всесоюз. семинара по проблемам физики реакторов. Москва 7–9 июня 1982 г. М., 1983. С. 30–33.
29. Бычков М. В., Жук И. В., Светлакова Н. Н. и др. Физика ядерных реакторов на диссоциирующем теплоносителе: Сб. статей. Мн., 1984. С. 133–140.
30. Груша Н. М., Кухаев А. И., Чуркин Ю. И., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1986. № 1. С. 3–9.
31. Едчик И. А., Ярошевич О. И. Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика реакторов». 1991. С. 45–48.
32. Alekseev P., Morosov A., Slesarev I. et al. // Intern. Conf. on the Physics of Reactors: Operation, Design and Computation. 23–27 April. 1990. Marseille – France. 1990. P. SIII-3 – SIII-11.
33. Ананич П. И., Казазян В. Т., Кувшинов В. И. и др. // Докл. на конф. «Ядерные технологии XXI века». Мн., 2010. С. 151–156.
34. Литвиненко Б. А., Белявский Я. Д., Ярошевич О. И. А. с. СССР 786635. 1979.
35. Рогинец Л. П., Жук И. В., Малыхин А. П., Ярошевич О. И. А. с. СССР 470213. 1975.
36. Малыхин А. П., Жук И. В., Ярошевич О. И. и др. // Атомная энергия. 1976. Т. 41. С. 205–206.
37. Рогинец Л. П., Малыхин А. П., Жук И. В., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1975. № 4. С. 5–7.
38. Рогинец Л. П., Малыхин А. П., Жук И. В. и др. // Матер. III Всесоюз. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М., 1983. Т. 1. С. 162–169.
39. Жук И. В., Рогинец Л. П., Малыхин А. П. и др. // Матер. 3-го Всесоюз. семинара по проблемам физики реакторов. Москва 7–9 июня 1982 г. М., 1983. С. 207–211.
40. Рогинец Л. П., Жук И. В., Малыхин А. П., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1009221. 1982.
41. Сапожников В. В., Сикорин С. Н., Полозов С. А., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1088540. 1982.
42. Жук И. В., Малыхин А. П., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1132713. 1984.
43. Сикорин С. Н., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1985. № 2. С. 3–8.
44. Кухаев А. И., Серафимович И. Г., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1167984. 1985.
45. Полозов С. А., Сикорин С. Н., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1248458. 1984.
46. Полозов С. А., Сикорин С. Н., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1246785. 1986.
47. Ярошевич О. И., Кухаев А. И., Байрамышвили И. А. и др. А. с. СССР 1473580. 1988.
48. Сикорин С. Н., Едчик И. А., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1519439. 1986.
49. Gulnic S. I., Smirnov A. N., Malykhin A. P., Yaroshevich O. I. // Radiation Measurements. 1993. Vol. 21, N 3. P. 387–390.
50. Кухаев А. И., Серафимович И. Г., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1256771. 1984.
51. Сикорин С. Н., Ярошевич О. И. // Атомная энергия. 1993. Т. 74. С. 161–163.
52. Кухаев А. И., Серафимович И. Г., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1395000. 1988.
53. Полозов С. А., Сикорин С. Н., Сапожников В. В., Ярошевич О. И. А. с. СССР 1428076. 1986.
54. Malykhin A. P., Zhuk I. V., Yaroshevich O. I. // Radiation Measurements. 1993. Vol. 21, N 3. P. 453–454.
55. Malykhin A. P., Sikorin S. N., Yaroshevich O. I. // Proc. of the Specialists' meeting on In-Core Assessment. 14–17 Oct. 1996. Mito (Japan), 1996.
56. Бушуев А. В., Зубарев В. Н., Ломоносова Е. М. и др. Препринт/МИФИ 013–96. М., 1996. 88 с.
57. Гриневич Ф. А., Чуркин Ю. И., Ярошевич О. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1979. № 3. С. 123–128.
58. Брылева В. А., Жук И. В., Киевец М. К. и др. // Матер. Междунар. конф. «Безопасность АЭС и подготовка персонала». 6–10 окт. 2003. Обнинск. Россия, 2003. С. 73–77.
59. Chigrinov S., Petlitsky V., Rutkovskaya K. et al. // Proc. of 2nd Int. Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies & Applications (ADTTA), Kalmar, Sweden, June 1996. Vol. 2. P. 737–741.
60. Chigrinov S. E., Serafimovich I. G., Rutkovskaya K. K. et al. // Proc. of Intern. Conf. «Accelerator Driven Transmutation Technologies and Application» Prague. 7–11 June. 1999.
61. Киевицкая А. И. // Энергетическая стратегия. 2009. № 5(11). С. 28–31.
62. Cao Y., Smith D., Kiyavitskaya H. et al. // Докл. II Международной конференции «Ядерные технологии XXI века». Мн., 2010. С. 262–266.

63. Kiyavitskaya H., Bournos V., Gohar Y. et al. // Докл. II Междунар. конф. «Ядерные технологии XXI века». Мн., 2010. С. 253–261.
64. Talamo A., Gohar Y., Alberti G. et al. // Докл. II Междунар. конф. «Ядерные технологии XXI века», Мн., 2010. С. 248–252.
65. Sikorin S., Polazau S., Mandzik S. et al. The International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management (RRFM) & Meeting of the International Group of Research Reactors (IGORR), Prague, Czech Republic, 18 – 22 March 2012. Transactions. Brussels: ENS, 2012. P. 630–636.
66. Sikorin S., Mandzik S., Polazau S. et al. // European Research Reactor Conference (RRFM 2013), St. Petersburg, Russia, 21–25 April 2013. Transactions. Brussels: ENS, 2013. P. 524–530.
67. Sikorin S. N., Mandzik S. G., Polazau S. A. et al. // European Research Reactor Conference (RRFM 2014), Ljubljana, Slovenia, 30 March – 3 April 2014. Transactions. Brussels: ENS, 2014. P. 559–566.
68. Sikorin S. N., Mandzik S. G., Polazau S. A. et al. // European Nuclear Conference (ENC 2014), 11–15 May 2014, Marseille, France: Transactions. Brussels: ENS, 2014.
69. Шароваров Г. А. и др. // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. 2008. С. 31–39.
70. Шароваров Г. А., Боровой А. А., Левадный В. А. Патент 375 СССР. 1997.
71. Шароваров Г. А. // Вестн. Фонда фундаментальных исследований. 2012. Т. 1. С. 71–83.
72. Ананич П. И., Герасько В. Н., Сикорин С. Н. и др. Препринт 98-4/ НАН Украины. Межотрасл. науч.-техн. центр «Укрытие». Чернобыль. 1998. 23 с.
73. Boulyga S. F., Zhuk I. V., Lomonosova E. M. et al. // Radiation Measurements. 1995. Vol. 25, N 1-4. P. 419–420.
74. Zhuk I. V., Svetlakova N. N., Yaroshevich O. I. et al. // Nucl. Geophys. 1995. Vol. 9, N 3. P. 235–239.
75. Lomonosova E. M., Kievetz M. K., Yaroshevich O. I. et al. // Radiation Measurements. 1995. Vol. 25, N 1-4. P. 385–387.
76. Boulyga S. F., Erdmann N., Zhuk I. V. et al. // Radiation Measurements. 1997. Vol. 28, N 1-6. P. 349–352.
77. Tzechanovitch., Zhuk I. V., Yaroshevich O. I. et al. // II Intern. Workshop «Solid State Nuclear Track Detectors and Their Application», 24–26 March 1992, Dubna. Proceedings. P. 148–150.
78. Канаиш Н. В., Миронов В. П., Ярошевич О. И. и др. // Атомная техника за рубежом. 1998. № 4. С. 3–9.
79. Kievitskaja A. I., Zhuk I. V., Yaroshevich O. I. et al. // Radiation Measurements. 1999. Vol. 31, N 1–6. P. 191–196.
80. Герменчук М. Г., Шагалова Э. Д., Ярошевич О. И. и др. // Тр. Междунар. Конф. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». Москва, 24–26 апреля 2000. СПб, 2000. Т. 1. С. 376–384.
81. Bushuev A. V., Zubarev V. N., Zhuk I. V. et al. // Atomic Energy. 1997. Vol. 28, N 2. P. 116–123.
82. Кулебякин Л. Ю., Мальхин А. П., Ярошевич О. И. и др. // Проблемы использования ядерной энергии / Сб. докл. науч. семинара, посвященного 85-летию академика А. К. Красина. Мн., 1996. С. 12–19.
83. Михалевич А. А., Казазян В. Т., Мальхин А. П. // Докл. Междунар. конф. «Ядерные технологии XXI века: Критерии существования и решения». Минск, 24–26 окт. 2001. Мн., 2001.
84. Михалевич А. А., Груша Н. М., Ярошевич О. И. и др. // Наука – энергетике. Мн., 2001. С. 177–181.
85. Жук И. В., Кудряшов В. П., Ярошевич О. И. и др. Препринт ОИЭЯИ-31. Мн., 2008. С. 47.
86. Наумов В. А., Рубин И. Е., Литвиненко Б. А. и др. Препринт ИПЭ-14. Мн., 1996. С. 45.
87. Додь А. И., Тарасенко В. В., Тверковкин и др. // Наука – энергетике. Мн., 1999. С. 180–190.
88. Коньшин В. А. Ядерно-физические константы делящихся ядер: Справочник. М., 1984.
89. Soukhovitskii E. Sh., Quesada J. M., Bauge E. et al. // Journ. of Nuclear Science and Technology. 2008. Vol. 45, N 4. P. 333–340.
90. Государственная программа «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009–2010 годы и на период до 2020 года». Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28 августа 2009 г. № 1116.
91. Sikorin S. N., Kuvshinov V. I., Kazazyan V. T. et al. European Research Reactor Conference (RRFM 2013), St. Petersburg, Russia, 21–25 April 2013. Transactions. Brussels: ENS, 2013. P. 531–536.
92. Сикорин С. Н., Кувшинов В. И., Драгунов Ю. Г. и др. «Транспортная энергетическая установка малой мощности «ГРЭМ» / Союзное государство, дек. 2010, С. 52–53.
93. Dragunov Y., Urivski V., Sikorin S. et al. // European Nuclear Conference (ENC 2012), Manchester, United Kingdom, 9–12 December 2012. Transactions – Poster. Brussels: ENS, 2012. P. 64–68.
94. Сикорин С. Н., Казазян В. Т., Григорович Т. К. // Междунар. конф. «Россия–Беларусь–Сколково: единое инновационное пространство». Минск, Республика Беларусь, 19 сент. 2012: Тез. докл. Мн., 2012.

O. I. YAROSHEVICH, I. V. ZHUK, V. T. KAZAZYAN, I. E. RUBIN, L. I. SALNIKOV, S. N. SIKORIN

INVESTIGATIONS IN THE FIELDS OF THE NUCLEAR REACTOR PHYSICS AND IONIZING RADIATIONS IN JINPR – SOSNY OF THE NAS OF BELARUS

Summary

The history of the development of the science researches on nuclear reactor physics and techniques, description of the experimental and calculate-analytical base of JNE and JINPR – Sosny as well as the scientific links with other organizations in the past and nowadays are presented. A few new tendency of the fundamental science researches on increasing nuclear and radiation NPP safety in the future and the ways of using radiation of the nuclear spent fuel are described.