

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Исследовательские установки РФЯЦ – ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов

(к 75-летию Атомной отрасли)

Н.В. Завьялов

Описаны задачи в области ядерной физики, для решения которых в составе Конструкторского бюро 11 (КБ11) при реализации атомного проекта создавалось подразделение экспериментальной физики, ныне Институт ядерной и радиационной физики (ИЯРФ) — центр компетенций Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) в области экспериментальной ядерной и радиационной физики. Показаны трансформация этих задач во времени и образование на их основе новых направлений деятельности. Представлены данные о современном состоянии, перспективах и планах развития экспериментальной базы ВНИИЭФ (ИЯРФ). Данная статья представляет собой расширенную версию доклада на сессии Отделения физических наук РАН, посвящённой 75-летию Атомной отрасли, 7 декабря 2020 г.

Ключевые слова: ядерная и радиационная физика, ядерные реакции, сечения взаимодействия, регистрация ионизирующих излучений, источники ионизирующих излучений, размножающие сборки, импульсные ядерные реакторы, ускорители электронов, радиография

PACS numbers: 28.41. –i, 28.70. +y

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.12.038933>

Содержание

1. Введение (547).
2. Измерения элементарных констант и модельные эксперименты (549).
3. Определение критической массы оружейных материалов. Эксперименты с размножающими сборками (550).
4. Натурные испытания. Разработка приборов и установок, обеспечивающих ядерно-физические исследования и измерения в натуральных опытах (551).
5. Новые знания по ядерной физике (554).
6. Исследовательские импульсные ядерные реакторы (554).
7. Радиационная стойкость (556).
 - 7.1. Разработка ускорителей электронов.
 - 7.2. Моделирующие установки и облучательные комплексы — экспериментальная база федерального уровня.
8. Радиография (558).
9. Перспективные работы и направления деятельности (559).

- 9.1. Создание Межведомственного центра комплексных радиационных исследований и испытаний.
 - 9.2. Фабрика сверхтяжёлых элементов.
 10. Заключение (561).
- Список литературы (562).

1. Введение

Становление и развитие экспериментальной базы Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) неразрывно связано с разработкой, испытаниями и совершенствованием ядерного оружия. В период создания первых образцов и их отработки существовал довольно значительный перечень вопросов по ядерной физике, на которые надо было найти ответы, либо проводя экспериментальные исследования, либо, сознательно рискуя, выбирать вариант ответа из числа возможных (как это было с утверждением С.П. Королёва: "Луна твёрдая!").

Для получения ответов на некоторые из вопросов в Конструкторском бюро 11 (КБ11) (теперь ВНИИЭФ) в 1952 г. было создано подразделение экспериментальной физики "для экспериментального обоснования в лабораторных и экспедиционных условиях идей, методов расчёта и характеристик изделий" (цитата из приказа по КБ11 о создании подразделения экспериментальной фи-

Н.В. Завьялов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, просп. Мира 37, 607190 Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация
E-mail: NVZavyalov@vniief.ru

Статья поступила 16 февраля 2021 г.

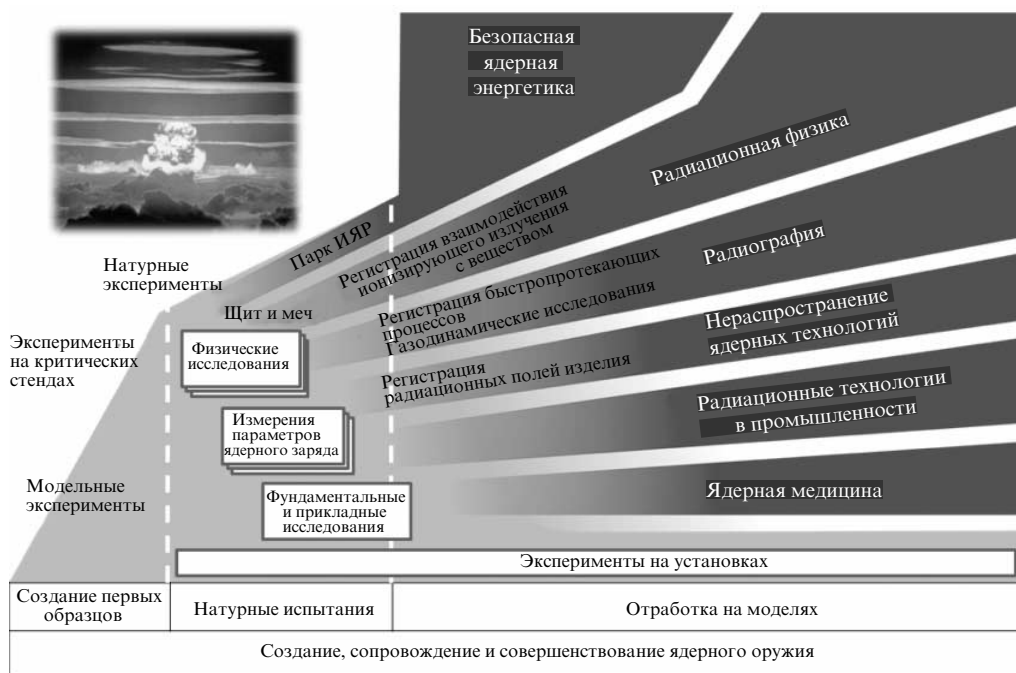


Рис. 1. Общая картина развития экспериментальной базы ВНИИЭФ.

зики). Наиболее важными из вопросов были определение сечений ядерных реакций для физико-математических моделей расчётного исследования процессов термоядерного горения и задачи гамма-спектрометрии и нейтронной спектрометрии.

Экспериментальные исследования проводились одновременно по трём направлениям: анализ и уточнение отечественных и зарубежных ядерных данных, разработка методик физических измерений при натурных испытаниях изделий, создание лабораторных источников ионизирующих излучений и аппаратурных комплексов для регистрации излучений [1–8].

Общая картина, по которой хорошо прослеживается логически обусловленный путь развития экспериментальной базы для научных исследований в области ядерной физики, идеологом и организатором которых был Георгий Николаевич Флёров, представлена на рис. 1, где выделены три временных отрезка:

— начальный этап, когда расчёты заряда требовали знаний о ядерных процессах, а надёжные количественные данные по основным ядерным реакциям практически отсутствовали или являлись противоречивыми (по разным публикациям). Одной из важнейших задач этого этапа было экспериментальное получение количественного значения критической массы оружейных материалов;

— второй временной отрезок — между испытаниями первых образцов ядерного заряда и прекращением натурных испытаний в соответствии с Договором о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ, 1996 г.) — характеризуется огромным объёмом работ по измерениям фактических параметров созданных ядерных зарядов — характеристик источников ионизирующих излучений — и работ по разработке средств, позволяющих выполнять такие измерения и проводить исследования для получения гарантированных данных по надёжности ядерного оружия;

— третий временной отрезок — период, когда натурные испытания ядерных зарядов полностью прекраще-

ны. Задачи сопровождения ядерного арсенала страны наряду с исследованиями физических моделей работы ядерных зарядов по-прежнему требовали и требуют экспериментального подтверждения надёжности и безопасности ядерного оружия, поддержания и развития экспериментальной базы, созданной для этих целей и модифицированной с учётом новых направлений её использования.

Современное состояние экспериментальной базы — это результат многолетней деятельности подразделения экспериментальной физики по направлениям, берущим своё начало в решении задач создания и совершенствования ядерных зарядов. Процесс развития экспериментальной базы сопровождался появлением новых возможностей её использования в смежных областях [9].

С рентгенограмм регистрации быстропротекающих процессов, с бетатронов типа БИМ — "бетатрон импульсный малогабаритный" и небольших ускорительных трубок началось направление радиографии (с разными источниками ионизирующих излучений, многокадровой и многокадровой регистрацией) с широким кругом задач — от газодинамических исследований до контроля однородности топлива в ракетах или обнаружения дефектов в массивных металлических конструкциях.

С регистрации наведённого потенциала на кабелях подрыва в натурных испытаниях начинались исследования и испытания по радиационной стойкости. Сегодня радиационная физика — чрезвычайно широкая область деятельности — от исследований механизмов радиационных поражений до обеспечения радиационной надёжности космической техники.

Измерения радиационных полей изделий привели к разработке научно-методических основ контролирования спецматериалов в закрытых упаковках, к созданию аппаратуры объективного радиационного контроля в системах физической защиты объектов, к созданию радиационных приборов таможенного и пограничного контроля, аппаратуры для контроля соблюдения международных соглашений [1, 10].

Решение задач по определению критической массы оружейных материалов послужило основой создания парка импульсных исследовательских реакторов, предоставляющих уникальные возможности по исследованиям в области безопасности ядерной энергетики.

На третьем временном отрезке рис. 1 показаны только основные направления деятельности, получившие развитие.

2. Измерения элементарных констант и модельные эксперименты

Подтверждение методик расчётов, используемых при разработке ядерного заряда (ЯЗ), проводилось сравнением расчётных данных с экспериментальными результатами, полученными на модельных сборках из ядерных материалов (метод "модельного приближения"). На рисунке 2 [11] приведён пример экспериментальных результатов по определению полного интегрального сечения образования гамма-квантов на алюминии для гамма-квантов с энергией 0,75–1,0 МэВ.

Расчёты заряда требовали знаний о ядерных процессах в широком диапазоне энергий взаимодействующих частиц. Надо было определить как сечения самих термоядерных реакций, так и сечения взаимодействия нейтронов с ядрами многих элементов, входящих в состав конструкции заряда.

На начальном этапе определение "эффективных" значений элементарных констант проводилось на упрощённых ("плоских") модельных сборках. Позднее, при создании термоядерных зарядов, имеющих принципиально новую, гораздо более сложную конструкцию (начиная с изделия РДС-6), на модельных сборках проводилось экспериментальное определение других параметров: "коэффициентов использования" нейтронов, генерации и регенерации трития. Такие модельные эксперименты потребовали создания дейтерий-тритиевых (DT) генераторов нейтронов, новых детекторов и методик детектирования.

Ещё немного позднее, на этапе разработки более совершенных и мощных ЯЗ, потребовалось экспериментальное подтверждение работоспособности новых прин-

ципов зарядостроения, в частности оценки нейтронного разогрева и др.

На специально разработанной конструкции, моделирующей термоядерный заряд, и экспериментальных установках были измерены сечения и угловые распределения реакции $D(n,2n)H$ при энергии нейтронов 14 МэВ, определены сечения захвата нейтронов ядрами ^{238}U и ^{232}Th , определено среднее число вторичных нейтронов ядер ^{235}U и ^{232}Th при их делении DT-нейтронами, изучено прохождение нейтронов с энергией 14 МэВ, а также нейтронный спектр деления через слои различных оболочек и др.

Устройство модели (см. придуманный сотрудниками модельной группы сувенир "Мефистофель на водородной бомбе", показанный на рис. 3), отражающей структуру и конструкцию заряда, предусматривало размещение в ней нейтронного источника и активационных детекторов регистрации нейтронного излучения. Одновременно проводились измерения элементарных ядерно-физических констант с использованием высокоинтенсивного фотонейтронного источника и низковольтного нейтронного генератора (ускорительной трубки). Работы на модели позволили исследовать пространственное и энергетическое распределение нейтронов и различных реакций, происходящих в модели.

Были разработаны уникальные методы измерений (как сказал А.Д. Сахаров, "ювелирные по материалам и исполнению"), в результате которых выявлена необходимость коррекции системы констант, применяемой в расчётах зарядов.

Модельные эксперименты рассматривались как необходимая составная часть всего комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию термоядерных зарядов, как завершающий этап лабораторной отработки зарядов перед их отправкой на полигон.

Модельные измерения и измерения элементарных констант взаимно дополняли друг друга. Экспериментальное изучение процессов, протекающих в термоядерном заряде, и привлечение теоретических данных позволили определить конструкцию первого отечественного термоядерного заряда.

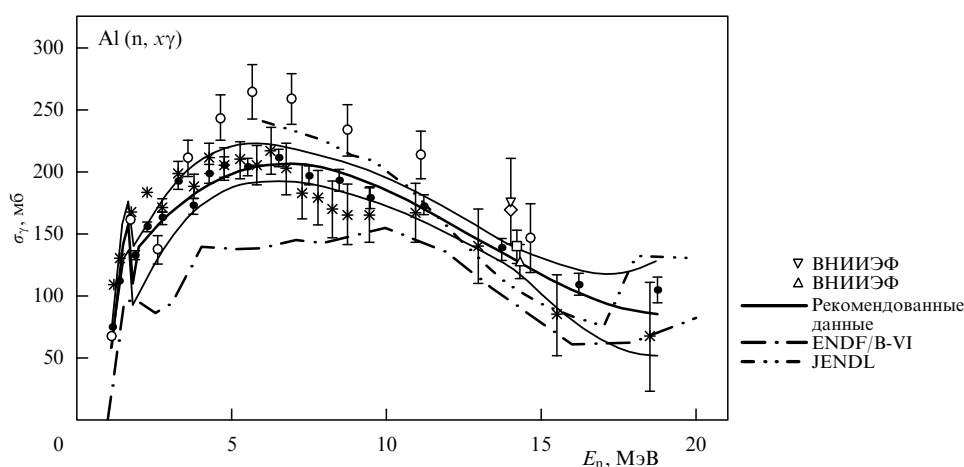


Рис. 2. Пример оценки и уточнения рекомендованных данных (показаны сплошной жирной кривой) по результатам сравнения полученных разными авторами (обозначены различными символами и кривыми) экспериментальных и расчётных значений сечения реакции (n, γ) для алюминия в зависимости от энергии нейтронов. ENDF — Evaluated Nuclear Structure Data File, JENDL — Japanese Evaluated Nuclear Data Library.



Рис. 3. Сувенир "Мефистофель на водородной бомбе", придуманный сотрудниками "модельной" группы. По идее авторов, дьявол, сидящий на шаре, по масштабу соответствующем реально использовавшейся модели, показывает нос американцам, с которыми шло соревнование. Фото сувенира опубликовано в журнале *Успехи физических наук* (том 161, №5, 1991 год), размещено на входной двери музея И.В. Курчатова в Москве, приведено в изданной в США книге *Создание водородной бомбы* (1995 г.), воспроизведено в журнале *Атом* (2002 г.).

3. Определение критической массы оружейных материалов. Эксперименты с размножающими сборками

Определение критической массы оружейных материалов атомного заряда — ключевой вопрос, возникший при

разработке первых образцов атомных зарядов. Для решения данной задачи надо было исследовать характеристики взаимодействия нейтронов различных энергий с ядрами тяжёлых элементов. Надо было узнать число нейтронов на акт деления, энергетический спектр нейтронов деления и выбрать оптимальный материал отражателя. Необходимость получения ответов на эти вопросы послужила отправной точкой и на многие годы для подразделения экспериментальной физики предопределила направления деятельности по созданию источников нейтронов [12] и по разработке соответствующей измерительной аппаратуры, включая детекторы нейтронов.

В 1948 г. Г.Н. Флёров создаёт нейтронно-физическую лабораторию и проводит первые эксперименты по определению критической массы первых атомных зарядов. Лаборатория проведения измерений критической массы с размножающими системами на быстрых нейтронах была одним из первых структурных образований сектора экспериментальной физики. Уже в 1950 г. начались активные работы на стационарной установке, являвшейся интенсивным источником нейтронов спектра деления (рис. 4).

На установке осуществлялось сближение верхней и нижней составных частей размножающей (критической) системы. Изменением состава частей (и расстояния между ними) варьировалась критичность системы. Установка получила сокращённое название ФКБН (физический котёл на быстрых нейтронах). На стендах типа ФКБН проводились и проводятся исследования различных моделей ядерных зарядов.

К особенностям работы на стендах с размножающими сборками следует отнести необходимость проведения экспериментов с максимально близким подходом к критическому состоянию, что должно обеспечить точность последующей экстраполяции. Одновременно должна быть обеспечена надёжная защита от аварий за счёт быстрого разведения частей сборки.

Проблема развития и совершенствования средств обеспечения безопасности на ядерных установках была, остаётся и в течение всех грядущих лет эксплуатации неизменно будет наиважнейшей [13].

За прошедшие годы конструкция ФКБН совершенствовалась по мере накопления опыта: модификации стенда (1-я, 2-я, 3-я) и их модернизированные версии были

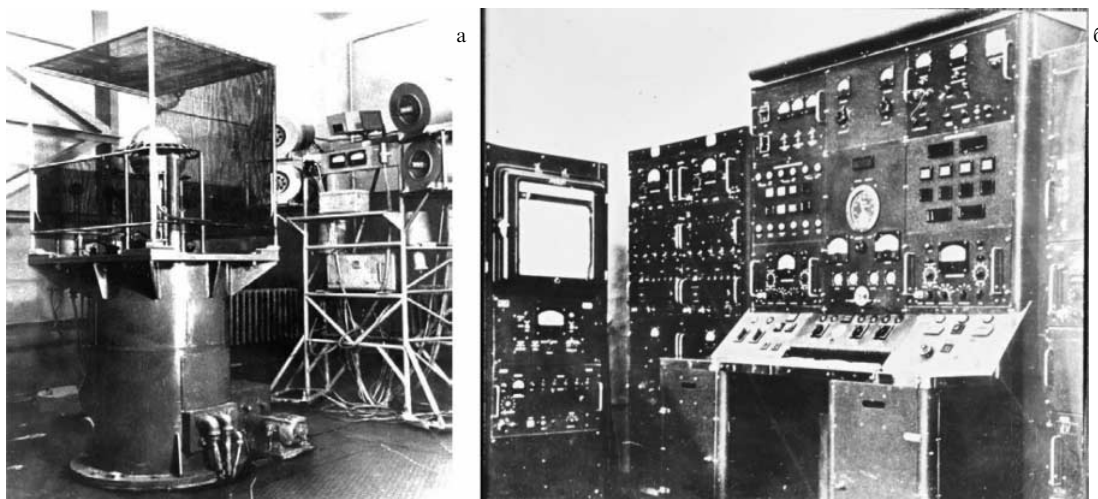


Рис. 4. Стенд ФКБН-1 (1955 г.) для исследований критической массы (а) и пульт управления стендом (б). (Фотографии В.А. Разуваева.)

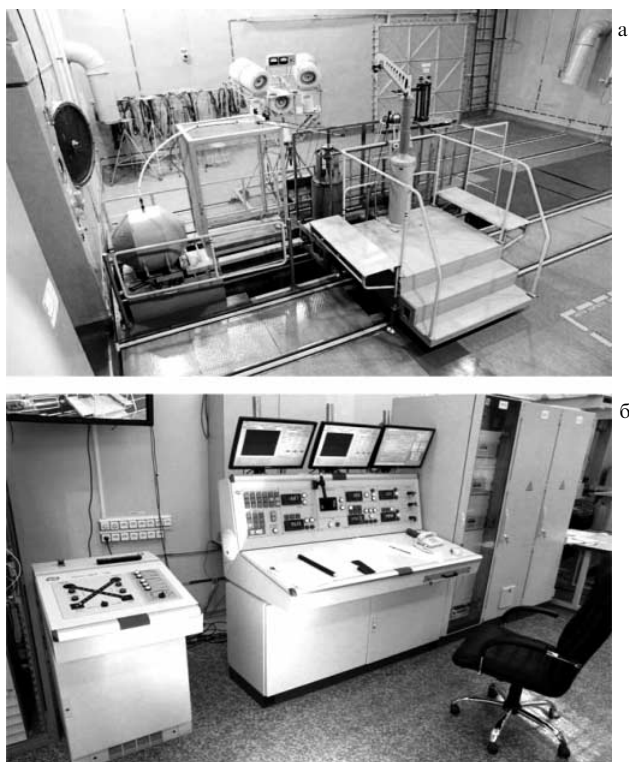


Рис. 5. Действующий критический стенд ФКБН-3 (а) и пульт управления стендом (б). (Фотографии А.Е. Малеева.)

созданы в 1950, 1955, 1959, 1963, 1976, 2001, 2015 годах (рис. 5). Общим для конструкций всех стендов являлось разделение размножающей системы на две части (верхнюю и нижнюю). При этом верхняя часть собиралась на неподвижной (либо перемещающейся только в горизонтальной плоскости) подставке, а нижняя часть — на столе, который затем дистанционно поднимался, обеспечивая сближение частей размножающих систем. Аварийная защита обеспечивалась за счёт сброса стола и регулирующей пробки под действием силы тяжести.

Кроме критических стендов, предназначенных для исследований небольших по размерам размножающих систем, во ВНИИЭФ (ИЯРФ) был создан критический стенд ИКАР-С для изучения ядерно-физических характеристик крупногабаритных систем, моделирующих активную зону (АЗ) реактора-лазера [14]. Эти работы являлись составной частью многолетней программы исследований в ИЯРФ – ВНИИЭФ по изучению возможности создания лазеров с ядерной накачкой. В настоящее время критический стенд ИКАР-С используется как инструмент исследования радиационной стойкости образцов военной техники (ВТ).

За прошедшее время на критическом стенде ФКБН исследованы параметры ≈ 1200 различных размножающих систем, в том числе с активной зоной из ^{235}U (96%), ^{235}U (90%), ^{235}U (75%), ^{235}U (36%); сплава ^{235}U (90%) и Mo (9%); твёрдых имитаторов водных растворов ^{235}U (90%), ^{239}Pu (88%) в α - и δ -фазах и ^{239}Pu (98%) в δ -фазе. В экспериментах измерялся коэффициент умножения или реактивность для определения степени подкритичности системы. Большинство исследованных систем (конструкций) имело сферическую геометрию.

На критическом стенде ФКБН проводились и проводятся исследования пространственно энергетических рас-

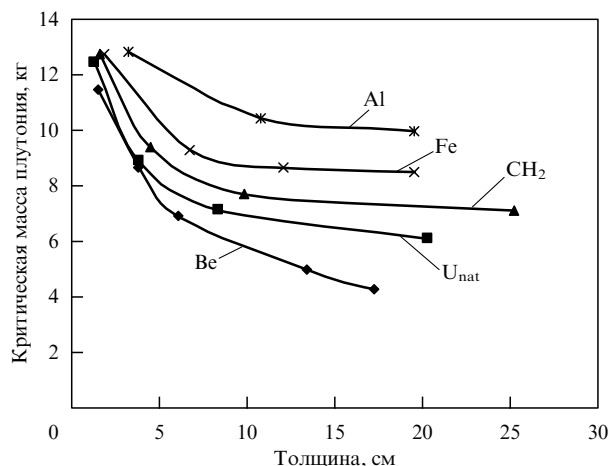


Рис. 6. Зависимость критической массы плутония в δ -фазе от материала и толщины отражателя.

пределений нейтронов и полных чисел реакций, спектров нейтронов в центре размножающей системы и спектров нейтронов утечки. Регистрация спадов плотности мгновенных нейтронов во времени позволяет определить постоянную спада и константу росси-альфа, а также время жизни мгновенных нейтронов [15–22].

Исследованы возможности использования в качестве отражателей различных материалов (в том числе воды, полиэтилена, меди, графита, алюминия, железа, бериллия, оксида бериллия, урана ^{238}U , естественного урана (U_{nat}), бетона, свинца, вольфрама, никеля, молибдена, титана, карбида бора, циркония и др.). На рисунке 6 для примера приведены результаты экспериментов по выбору материала отражателя [20]. Более 30 тестовых критических систем представлены в Международном справочнике оценённых тестовых экспериментов по критической безопасности.

На критическом стенде ФКБН проведены исследования ядерно-физических характеристик моделей различных бланкетов: жидкосолевого бланкета, каскадного бланкета для электроядерной установки с пороговым делящимся веществом ^{237}Np , размножающими системами, содержащими ванадий, свинец и др. В помещениях установок ФКБН проводилась работа по предварительной сборке реакторов ГИР (гамма-источник реакторный), РИР (разрушающийся импульсный реактор), БР-К1 (бустер-реактор "Каскад", вариант 1).

4. Натурные испытания. Разработка приборов и установок, обеспечивающих ядерно-физические исследования и измерения в натуральных опытах

Всякий взрыв — это процесс, который, как и жизнь человека, проходит все стадии развития: рождается, растёт, стареет и умирает. Только в атомной бомбе этот процесс протекает за микросекунды. И если эти мгновенные процессы мы сумеем записать в виде графиков на бумаге или на фотоплёнке, считайте, что атомная бомба у нас в кармане.

(Первый заместитель научного руководителя Атомного проекта К.И. Щёлкин.)

Задача определения параметров ядерного заряда (ЯЗ) в первые десятилетия была ключевой задачей подразделения экспериментальной физики.

Измерения при ядерном взрыве позволяют получать информацию о режиме работы ядерного заряда, правильности выбранной расчётно-конструкторской схемы, дают возможность уточнять механизмы и уровни воздействия поражающих факторов ядерного взрыва на различные военные и гражданские объекты, позволяют осуществлять выбор необходимых средств защиты.

Определение параметров ЯЗ предполагает предложение, отработку, освоение и реализацию множества диагностических методов. К ним могут быть отнесены: методы регистрации параметров излучений ядерного взрыва (оптического, теплового, гамма-нейтронного, электромагнитного), определение параметров ударной и сейсмических волн, методы радиохимического анализа продуктов взрыва, способы выявления характера и величины отклика конструкций и материалов на воздействие поражающих факторов ядерного взрыва (деградация функциональных характеристик, структурные изменения вещества и др.) [3]. Достаточно очевидно, что выбор методов измерений и измерительных средств главным образом зависят от редакции проведения испытаний.

В натурных испытаниях требовалось получить данные (не менее чем двумя методиками, реализованными на разных физических принципах) по основным расчётным параметрам изделий: постоянная размножения нейтронов, энерговыделение заряда (его тротиловый эквивалент), температура горения термоядерной смеси, спектры всех видов излучений, параметры ударной волны [3].

Как известно [23], в стране до подписания ДВЗЯИ было проведено свыше 700 ядерных испытаний (в США — свыше 1000). Испытания проходили в самых разнообразных условиях: на поверхности земли, в атмосфере, под землёй в скважинах и штольнях, под водой. Технология измерений развивалась и видоизменялась одновременно с созданием новых образцов изделий и в соответствии с изменением редакций испытаний.

Фактически все методики физических измерений на испытаниях были уникальными. Разработано и испытано несколько сотен устройств и приборных узлов, обеспечивших регистрацию информации о работе изделий в самых сложных экспериментах.

Исследования и регистрация импульсных ионизирующих излучений в широком диапазоне потоков, пространственных, временных, спектральных и энергетических характеристик — это новое инженерно-техническое направление, новая научно-техническая отрасль. Испытатели подразделения экспериментальной физики (конечно, действуя вместе со специалистами других подразделений, предприятий и институтов) фактически стали создателями этой новой отрасли науки [24–29].

В первые годы в подразделении экспериментальной физики проводилась интенсивная работа по созданию комплекса гамма-нейтронных и радиохимических измерений применительно к атмосферным испытаниям атомных и термоядерных зарядов.

В период, когда шло совершенствование ядерных зарядов на основе новых физических принципов и технологий, для их отработки существенное развитие получила экспериментальная база.

Был создан комплекс установок и аппаратуры: новые (по тому времени) ускорители электронов МВ-15 (1957 г.), ЛУ-50 (1981 г.) (рис. 7), бетатрон Б-30 (1960 г.), электростатические ускорители ионов ЭГ-2 (1952–1954 гг.), ЭГ-5 (1957 г.), ЭГП-10 (1962 г.) (рис. 8), генератор ДТ-нейтро-



Рис. 7. Ускоритель электронов ЛУ-50. Граничная энергия электронов 50 МэВ, диапазон энергий фотонейтронов от 0,1 до 15 МэВ (создан совместно с Московским радиотехническим институтом). (Фотография В.А. Разуваева.)



Рис. 8. Электростатический перезарядный генератор (тандем) ЭГП-10, рабочий диапазон энергий ускоренных протонов от 1,0 до 12 МэВ; типы ускоренных частиц: ионы протия, дейтерия, трития, кислорода, углерода; источник отрицательных ионов — дуоплазмотрон. (Фотография А.Е. Малеева.)

нов НГ-150М (рис. 9), парк импульсных аperiodических реакторов, критический стенд ФКБН. Разработаны новые средства регистрации, детекторы излучений и методы обработки результатов (например, 4л-детектор нейтронов и гамма-квантов (рис. 10)).



Рис. 9. Образцовый источник термоядерных нейтронов: длительность импульса 30 нс, частота повторений $(1-5) \times 10^5$ Гц, погрешность определения флюенса 14-МэВ-ных нейтронов $\pm 2,5\%$. Статический генератор нейтронов разработан в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА), импульсный режим реализован во ВНИИЭФ. (Фотография А.Е. Малеева.)

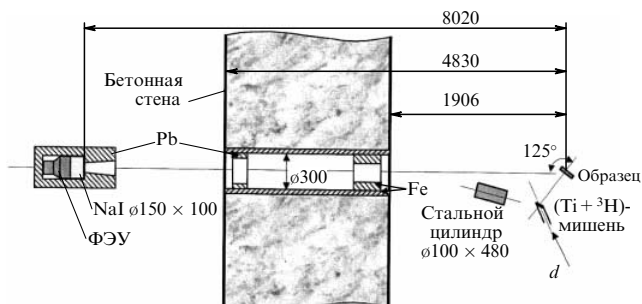


Рис. 11. Геометрия, в которой проводились измерения сечений образования гамма-квантов и их спектрального состава. Размеры указаны в миллиметрах.

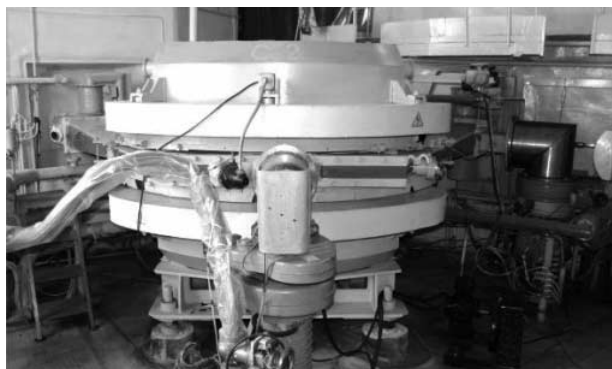


Рис. 12. Электромагнитный масс-сепаратор С-2. (Фотография А.Е. Малеева.)

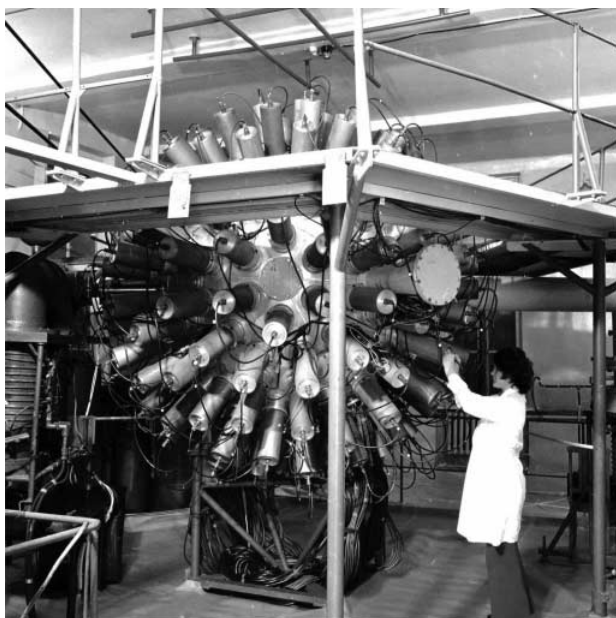


Рис. 10. 4 π -детектор нейтронов и гамма-квантов. (Фотография В.А. Разуваева.)

Надо отметить важность разработки метода абсолютной градуировки сцинтилляционных детекторов по чувствительности к термоядерным нейтронам, а также расчётного метода определения их чувствительности для остального энергетического диапазона регистрируемых нейтронов [30, 31]. Эта величина прежде экспериментально не определялась из-за отсутствия соответствующих нейтронных источников.

Погрешность определения спектральной чувствительности детекторов нейтронных методик изначально составляла не менее 40–50 %, использование нейтронного генератора НГ-150М позволило уменьшить погрешность определения чувствительности детекторов в ~ 10 раз.

Создание гамма-спектрометра и широкомасштабное внедрение расчётных методов Монте-Карло позволило к середине 1980-х годов разработать методику измерений

сечений образования гамма-квантов и их спектрального состава. Это дало возможность проводить (рис. 11) измерения сечений спектров образования гамма-квантов при неупругом рассеянии нейтронов на нескольких десятках различных материалов, включая делящиеся. Погрешность измерений на момент завершения работы находилась на уровне лучших зарубежных исследований.

Говоря об определении параметров ядерного заряда, надо хотя бы кратко упомянуть о радиохимических методах анализа продуктов ядерного взрыва, позволяющих устанавливать энергетическое выделение, дату взрыва, определять количество различных элементов в продуктах взрыва, исследовать процессы миграции радиоактивности и решать многие другие прикладные задачи [3]. В течение около 10 лет во ВНИИЭФ создавался первый в стране радиохимический комплекс (РХК) (введён в эксплуатацию в 1964 г.) — специальные здания и набор аппаратуры (пример — сепаратор (рис. 12)) и методик, реализующих обширные функциональные возможности по обработке радиоактивных проб, отбираемых при ядерных испытаниях. Многие годы комплекс радиохимических исследований был в стране одним из самых оснащённых и богатых по функциональным возможностям [33].

Разработанные радиохимические методы применялись во всех воздушных испытаниях, проведённых ВНИИЭФ, и почти в ста подземных испытаниях.

На комплексе в течение многих лет выполняются работы по производству высокообогащённых изотопов делящихся материалов.

Радиохимические методы и аппаратура использованы при исследованиях акватории Норвежского моря в районе затонувшей подводной лодки "Комсомолец".

Радиохимические методы и в настоящее время являются ключевыми в разработке и аттестации защитных сооружений, обеспечивающих радиационную и экологическую безопасность взрывных экспериментов.

5. Новые знания по ядерной физике

За годы проведения полномасштабных испытаний специалистами ИЯРФ развиты многие десятки методик физических измерений, созданы аппаратно-методические средства обеспечения практически всех подземных испытаний в штольнях и скважинах с зарядами ВНИИЭФ.

При проведении ядерно-физических исследований, отработке методик физических измерений и в измерениях в натуральных опытах получены новые знания в области зарядостроения, фундаментальной и прикладной физики [34–44]. Некоторые из них:

- сведения о пространственном и энергетическом распределении нейтронов и плотности ядерных реакций в ЯЗ (с использованием физических моделей);
- результаты исследований в области физики радиационного поражения;
- сведения о возможности создания мощных газовых лазеров с ядерной накачкой [45];
- данные по световыходу пластических сцинтилляторов при облучении их электронами, протонами, альфа-частицами;
- результаты измерений зависимости яркостной температуры фронта ударной волны в воздухе от скорости её распространения;
- экспериментальные данные по сечениям и спектрам образования гамма-квантов при неупругом рассеянии нейтронов на делящихся и конструкционных материалах;
- данные по сечениям деления, спектрам и множественности нейтронов деления; уточнённые нейтронные спектры при делении ^{235}U нейтронами с энергией 14 МэВ и для различных углов разлёта осколков;
- данные по физике деления нейтронами, протонами, дейтронами, тритонами и γ -квантами;
- результаты исследований изобар-аналоговых и гигантских резонансов на ядрах среднего и тяжёлого веса;
- данные о впервые выявленном гамов-теллеровском резонансе в составном ядре в реакции $^{117}\text{Sn}(p, n)^{117}\text{Sb}$ [46];
- данные о впервые обнаруженной гигантской пороговой аномалии в реакции $^7\text{Li}(t, p)^9\text{Li}$; для её анализа разработана резонансная теория пороговых явлений; впервые в анализе получены характеристики ядра ^{10}Li [47, 48];
- значения сечений образования трития в реакциях $^6\text{Li} + d$, $^7\text{Li} + d$, $^9\text{Be} + d$, измеренные радиохимическим методом;
- создание первого справочника по ядерным данным для термоядерного синтеза, который трансформировался в электронную библиотеку SABA (Sarov Base) [49];
- ядерно-физические константы для широкого круга ядер трансурановых элементов, в том числе для короткоживущих изотопов;
- результаты ядерно-физических измерений на нейтронах ядерного взрыва с использованием методики "по времени пролёта": сечений деления изотопов трансурановых элементов; данные по получению далёких трансурановых элементов;

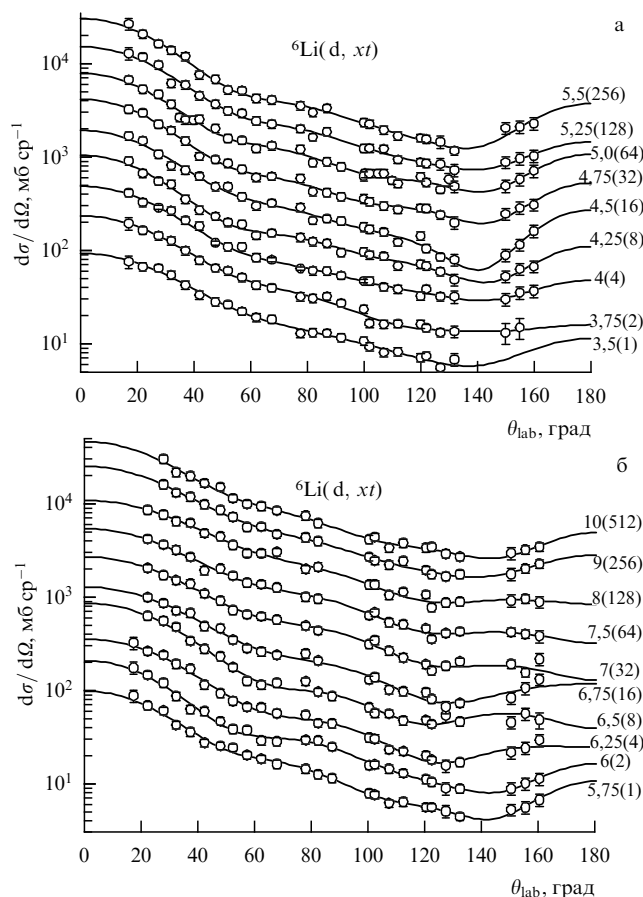


Рис. 13. Дифференциальные сечения реакции $^6\text{Li}(d, xt)$ (кружки — экспериментальные данные, кривые — описание) при энергии дейтронов (а) $E_d^0 = 3,5\text{--}5,5$ МэВ и (б) $E_d^0 = 5,75\text{--}10$ МэВ (на каждой кривой первое число указывает E_d^0 , а число в скобках — множитель для сечений) [50].

- данные по разработке экспериментальных методов измерений изотропической сжимаемости.

Благодаря продолжению ядерно-физических исследований на имеющихся установках экспериментальной базы за последнее десятилетие получены интересные результаты [50–54], в том числе измерены дифференциальные сечения (по углу) образования заряженных частиц в основных каналах реакций $^6\text{Li} + p$, $^6\text{Li} + d$, $^6\text{Li} + t$, $^7\text{Li} + p$, $^7\text{Li} + d$, $^7\text{Li} + t$, $^9\text{Be} + p$, $^9\text{Be} + d$, $^9\text{Be} + t$, $^{11}\text{B} + t$. По ним определены интегральные сечения, значительная часть которых является впервые полученной или существенно уточняет мировые данные. В качестве примера [50] на рис. 13 приведены в лабораторной системе координат впервые измеренные дифференциальные сечения реакции $^6\text{Li}(d, xt)$ — одной из важнейших реакций термоядерного горения с учётом реакций "на лету". Получение этих данных было мечтой нескольких предыдущих поколений физиков-ядерщиков.

6. Исследовательские импульсные ядерные реакторы

Решение задачи определения значения критической массы оружейных материалов, создание физического котла на быстрых нейтронах, исследования размножающих систем послужили одним из истоков начала работ по созданию импульсных исследовательских реакторов.

Вторым истоком послужили разработки расчётно-теоретических основ конструирования реакторов (предложения системы замкнутых уравнений по динамике реактора) и экспериментально оценённые предложения по ключевым конструкторским элементам [55 – 58]. Результаты этих работ значительно продвинули отечественную идеологию создания импульсных реакторов. Впоследствии материалы были обобщены в книге и монографии В.Ф. Колесова [59, 60].

Результаты теоретических обоснований и конструкторских проработок ВНИИЭФ рассматривались, как правило, отраслевым научно-техническим советом (НТС). Например, решение НТС по созданию во ВНИИЭФ самого мощного в мире импульсного реактора на быстрых нейтронах — БИГР (быстрый импульсный графитовый реактор) с уникальной керамической активной зоной (АЗ), создаваемой методами порошковой металлургии, было одобрено авторитетными учёными того времени (А.П. Александров, И.К. Кикоин, М.Д. Миллионщиков, Н.А. Доллежал, Ю.Б. Харитон, А.А. Бочвар и др.). На основе этих решений было принято специальное постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР о создании БИГР. На многие годы это стало одним из важных направлений деятельности подразделения экспериментальной физики [61 – 68].

Импульсные исследовательские реакторы представляют собой устройства, обеспечивающие на короткое время условия для развития цепной реакции делений на мгновенных нейтронах. Во ВНИИЭФ разрабатывались импульсные ядерные реакторы (ИЯР) самогасящего действия, в которых вспышка делений инициируется быстрым вводом избыточной реактивности, а гасится за счёт отрицательной обратной связи температура – реактивность. В этих реакторах цепная реакция на мгновенных нейтронах во время вспышки контролируется только внутренним механизмом самогашения. Длительность импульса и его энергия определяются уровнем реализованной надкритичности, которая вводится импульсным блоком после его предварительной калибровки.

Представление о пройденном пути и том уникальном парке импульсных ядерных реакторов, разработанных во ВНИИЭФ, можно получить из рис. 14 и табл. 1.

ИЯР, разработанные во ВНИИЭФ, имеют специфические особенности, к которым следует отнести:

- "нулевое" энерговыделение (выгорание топлива за время эксплуатации не превышает нескольких граммов или даже долей грамма);

- отсутствие теплоносителя (охлаждение АЗ происходит, как правило, за счёт естественной конвекции или принудительного воздушного охлаждения);

- малый размер АЗ (см. табл. 1);

- малое количество органов регулирования реактивности (ОРР), которые выполняют одновременно и функцию органов аварийной защиты;

- высокое обогащение топлива (как правило, $\approx 90\%$ по изотопу ^{235}U);

- основной механизм отрицательной обратной связи температура – реактивность для ИЯР с металлической и керамической АЗ — тепловое расширение, для ИЯР с растворной АЗ — тепловое расширение и радиолитическое кипение;

- точное прогнозирование параметров импульса (погрешность $\pm 10\%$);

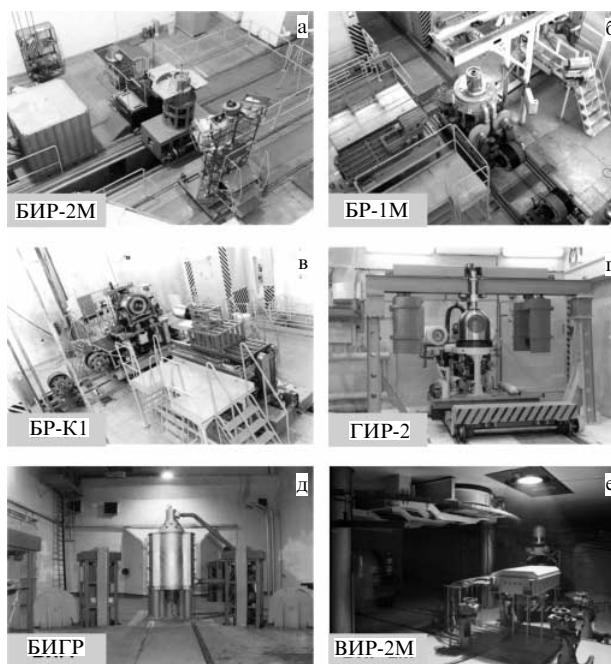


Рис. 14. Импульсные ядерные реакторы. (а) Быстрый импульсный реактор БИР-2М. (б) Бустер-реактор БР-1М. (в) Бустер-реактор "Каскад" БР-К1. (г) ГИР — гамма-источник реакторный. (д) БИГР — быстрый импульсный графитовый реактор. (е) Водный импульсный реактор ВИР-2М.

— специальная подготовка эксперимента для каждого импульса ИЯР, при этом интервалы между импульсами определяются временем подготовки опыта.

Кроме генерирования импульсов все ИЯР могут работать в статическом режиме, а также в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах (квазиимпульсов).

Во многих случаях ИЯР (по сути своей конструкции) работают в условиях, которые в обычной энергетической реакторной технике классифицируются как реактивная ядерная авария. Чтобы надёжно эксплуатировать такие установки, нужны специальные полноценные исследования по выявлению признаков приближения аварии и проверке возможностей возникновения аварийных ситуаций, когда специальными экспериментами определяют пределы безопасной эксплуатации ядерных установок (порог возникновения пластической деформации тепловыделяющих элементов, их возможные смещения, появление дефектов, например, по анализу спектров механических колебаний топливных элементов и др.).

Импульсные ядерные реакторы являются уникальными установками, позволяющими проводить различные физические исследования [69, 70].

На ИЯР проводятся эксперименты по сравнительному поведению топлива реакторов различного типа, по оценке уровней энтальпии, приводящей к разрушению твэлов (рис. 15).

На ИЯР ИЯРФ проведены уникальные эксперименты, направленные на обоснование пределов безопасной эксплуатации ИЯР: исследовано долговременное поведение реакторов в режиме саморегулирования мощности, отработана быстродействующая аварийная защита, позволяющая прервать развитие импульса с опасными параметрами.

Таблица 1. Импульсные ядерные реакторы ВНИИЭФ

Реактор	Водный импульсный реактор ВИР-2М	Быстрый импульсный реактор БИР-2М	Транспортный импульсный быстрый реактор ТИБР	Быстрый импульсный графитовый реактор БИГР	Бустер-реактор БР-1	Разрушающийся импульсный реактор РИР	Гамма-источник реакторный ГИР-2	Бустер-реактор "Каскад" БР-К1
Начало эксплуатации 1-й модификации, последней	1965 2013	1965 1991	1970	1977	1978 2009	1981 1984	1984 1993	1995 ~ 2023
Нынешнее состояние	Действует	Выведен из эксплуатации	Передан в НИИП*	Действует	Действует	2 опыта	Действует	Физический пуск
Масса топлива, кг	7,1 (104,8 л)	121	124	833	173	~ 25	178	1469
Размеры АЗ, см	∅ 55 × 63	∅ 22 × 22	∅ 27,5	∅ 76 × 67	∅ 27 × 27	~ ∅ 24	∅ 30	∅ 62 × 82
Полость, мм	∅ 142, ∅ 300	∅ 40	∅ 28	∅ 100	∅ 100	—	—	∅ 355 × 375
Энерговыделение за импульс, МДж	65	3	7	280	10	450	7	100
Максимальная температура, °С	250	300	700	900	590	Взрыв	400	620
Максимальная полуширина импульса, мкс	2650	55	480	2000	68	~ 2,5	300	600

* Научно-исследовательский институт приборостроения им. В.В. Тихомирова.

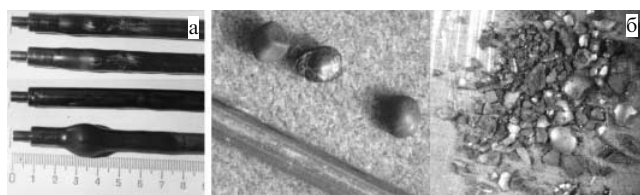


Рис. 15. (а) Образцы твэлов водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) после облучения на БИГР. (б) Микротвэлы до и после облучения. (Фотографии В.А. Разуваева.)

7. Радиационная стойкость

Подразделение экспериментальной физики прошло огромный путь по достижению современного состояния обеспеченности исследований и оценки уровней радиационной стойкости (РС) образцов военной техники, путь от сектора до Института ядерной и радиационной физики [71, 72]. Это путь от обнаружения эффектов радиационного поражения в полномасштабных испытаниях ядерных зарядов в виде сигналов "радиационной наводки" на кабелях подрыва изделий в полигонных опытах до экспериментов на специально созданных установках, моделирующих воздействия, вызывающие функциональные и силовые радиационные поражения.

Проблема обеспечения радиационной стойкости и её оценки остро актуализировалась с прекращением натурных испытаний и требованиями комплексно (с учётом разных поражающих факторов ядерного взрыва) оценивать стойкость широкой номенклатуры объектов — от микросхем до крупногабаритной техники.

7.1. Разработка ускорителей электронов

Важной составной частью работ по исследованиям проблем радиационной стойкости была деятельность по

созданию ускорителей электронов — источников ионизирующих излучений.

Правомерно утверждать, что ИЯРФ внёс свой вклад в мировую науку создания ускорителей и в формирование принципов физического моделирования воздействия поражающих факторов ЯВ. Результаты создания и применения ускорителей отмечены присуждением сотрудникам ИЯРФ двух Ленинских, двух Государственных премий и премии Правительства РФ.

В процессе работ по разработке ускорителей найдены и практически реализованы новые инженерные и технические решения, в некоторых случаях преодолевавшие сложившиеся в мире сомнения в возможности их реализации (эффективная проводка пучка на большие расстояния, конструкция кольцевых разрядников с наносекундным разбросом по включению и др.). Проблемы особенно обострились при создании источников ионизирующих излучений, обеспечивающих сочетание больших доз, коротких импульсов и больших площадей облучения.

Выявленные впервые закономерности выводили на новый профессиональный уровень знаний (ускоряющая система из индукторов в виде трансформаторов с одновитковыми первичным и вторичным тороидальными контурами, создание индуктора на радиальных линиях, использование многокаскадных ступенчатых линий и др.) [72, 73].

При разработке ускорителей и облучательных комплексов специалистами ИЯРФ получено свыше сотни авторских свидетельств и патентов на изобретения. Это только некоторые результаты работы школы А.И. Павловского — руководителя подразделения экспериментальной физики с 1971 г. по 1993 г. [74–77].

Специалистами этой школы разработан первый в стране (1967 г.) безжелезный линейный индукционный ускоритель, потом воспроизведённый для оснащения испытательного центра по радиационной стойкости (Лыткарино), созданного по решению правительства. В

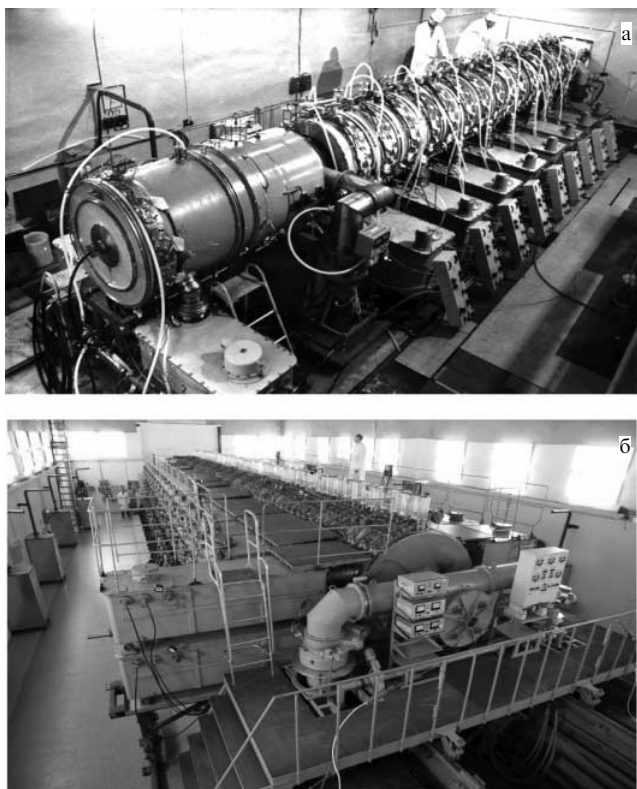


Рис. 16. (а) Общий вид линейного индукционного ускорителя ЛИУ-10М в составе первого в отрасли облучательного комплекса. (б) Ускоритель ЛИУ-30 — базовая установка облучательного комплекса. (Фотографии В.А. Разуваева и А.Е. Малеева.)

1977 г. введён в действие ускоритель на радиальных линиях (энергия 14 МэВ, ток пучка 40 кА, длительность токового импульса 20 нс) [73].

В 1970-х годах во ВНИИЭФ был проведён комплекс расчётных и экспериментальных исследований, на основе которых было принято решение правительства о строительстве облучательного комплекса "Пульсар".

В 1984 г. был введён в эксплуатацию первый облучательный комплекс (как прообраз "Пульсара") на базе ускорителя на радиальных линиях (рис. 16а) и импульсного ядерного реактора, а уже в 1986 г. введён в действие новый облучательный комплекс ("Пульсар") с одним из наиболее мощных в мире источников тормозного излучения (рис. 16б) [78, 79]. В 1994 г. первый облучательный комплекс был модифицирован.

Разработчики военной техники впервые получили возможность в лабораторных условиях моделировать воздействие ядерного взрыва путём генерации по заданной временной программе импульсов тормозного и гамма-нейтронного излучений.

С целью обеспечения более полного моделирования воздействия проникающих излучений оба комплекса дооснащены дополнительными электрофизическими установками: импульсным ускорителем электронов СТРАУС-2 (Ступенчатый трансформирующий ускоритель 2) [80] (рис. 17а) и малогабаритным импульсным ускорителем электронов АРСА (Арзамас-Саров) [81] (рис. 17б), размещёнными в облучательных залах комплексов.

Кроме того, один из комплексов дополнительно дооснащён двумя генераторами импульсов рентгеновского из-

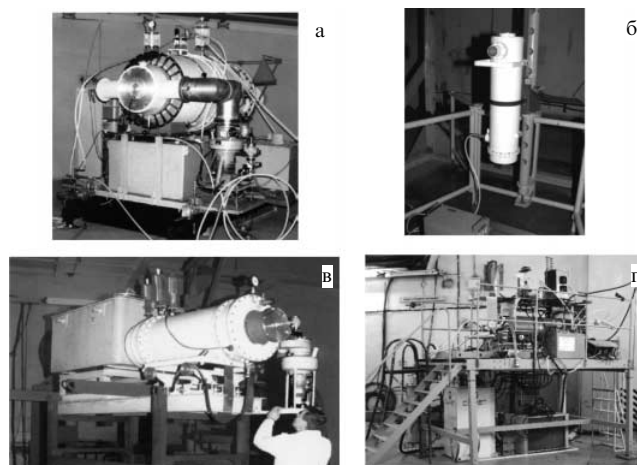


Рис. 17. Установки комплекса "Пульсар". (а) Общий вид ускорителя СТРАУС-2, созданного на основе пятикаскадной двойной ступенчатой формирующей линии с водяной изоляцией с внешним диаметром 1,3 м. Отличительной особенностью ускорителя СТРАУС-2 является то, что все его системы смонтированы на платформе, перемещаемой краном. (б) Общий вид ускорителя АРСА. В основе его конструкции — генератор Аркадьева–Маркса с импульсной зарядкой накопительных ёмкостей. Источником излучения является отпаянная ускорительная трубка с катодом лезвийного типа. Источник синхронизирован с другими электрофизическими установками комплекса. Производительность до 100 импульсов в смену. Для определения временного разрешения детекторов различного типа, аттестации и контроля работоспособности измерительных каналов на базе малогабаритного АРСА разработан субнаносекундный ускоритель электронов с газонаполненным формирователем. (в) Общий вид ускорителя ИЛТИ-1 (источник лабораторный транспортный импульсный). Перемещаемый генератор мощных импульсов рентгеновского излучения предназначен для моделирования последовательного воздействия двух или трёх импульсов тормозного излучения при совместной работе с другими ускорителями. В автономном режиме ускоритель обеспечивает нагрузку отдельных приборов излучением со смягчённым спектром благодаря специально разработанной близкофокусной ускорительной трубке с выводом излучения из тыльного полупространства мишени. Это по сравнению с общепринятым подходом позволило увеличить долю энергии излучения в заданном диапазоне с 15% до 50%. (г) Транспортный резонансный ускоритель электронов ЛУ-7-2, введённый в состав облучательного комплекса в 2007 г. Ускоритель, смонтированный на несущей платформе, может использоваться в промышленных радиационных технологиях и для дефектоскопии объектов с большими массовыми толщинами. (Фотографии А.Е. Малеева.)

лучения, рентгеновской статической установкой и линейным резонансным ускорителем электронов (рис. 17в, г).

Для моделирования дозового воздействия гамма-излучения разработан ускоритель ЛУ-10-20 (рис. 18).

Учениками А.И. Павловского продолжена разработка ускорителей на основе многокаскадных ступенчатых линий (СЛ). Было предложено несколько десятков различных схем генераторов с ёмкостным, индуктивным и индуктивно-ёмкостным накоплением энергии. На основе СЛ последовательно разработан ряд ускорителей, в которых экспериментально подтверждены расчётные характеристики пучков электронов и преимущества ускорителей на СЛ (по сравнению с ускорителями на радиальных линиях) [82, 83]. В середине 1990-х годов был введён в действие один из наиболее мощных ускорителей на ступенчатых линиях.

В итоге ускорители на ступенчатых линиях образовали семейство ускорителей, работающих в автономных



Рис. 18. Линейный резонансный ускоритель ЛУ-10-20, предназначенный для моделирования дозового воздействия гамма-излучения. (Фотография В.А. Разуваева.)

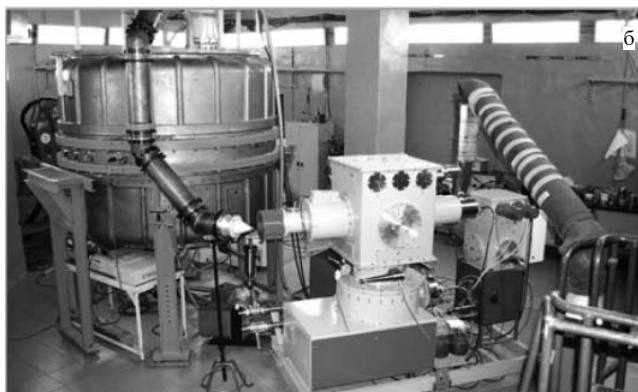
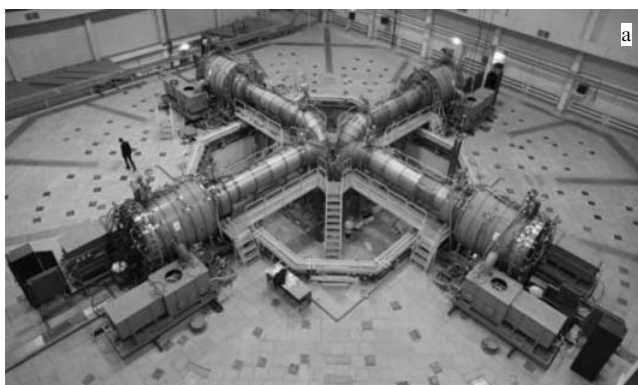


Рис. 19. Моделирующие установки нового поколения. (а) Общий вид четырёхмодульной установки "Гамма". (б) Действующий полномасштабный макет резонансного электронного ускорителя "Бета". (Фотографии А.Е. Малеева.)

режимах и в качестве инжекторов мощных установок. Развитие ускорителей на СЛ для их применения не только для задач радиационной стойкости, но и для газодинамических исследований и оценки конструкций рентгенографическими методами продолжается до настоящего времени.

Кроме того, проводятся иные разработки по развитию экспериментальной базы ВНИИЭФ с использованием ускорителей.

Создаётся мультитераваттная электрофизическая установка "Гамма" (рис. 19а). К настоящему времени создана четырёхмодульная установка, состоящая из четырёх импульсных сильноточных ускорителей электронов, генерирующих импульсы тормозного излучения с максимальной энергией квантов до 2 МэВ.

Совместно с институтами РАН осуществляется разработка резонансного электронного ускорителя с высокой средней мощностью пучка. Его основной элемент — ускоряющий коаксиальный полуволновой резонатор с рабочей частотой 100 МГц. Ускоритель предназначен для работы в импульсно-периодическом и непрерывном режиме генерации пучка. Создание такого ускорителя позволит получать пучки ускоренных электронов с энергиями 1,5, 4,5 и 7,5 МэВ в одном общем выводном устройстве при средней мощности пучка до 300 кВт. Действующий полномасштабный макет ускорителя представлен на рис. 19б [84].

7.2. Моделирующие установки и облучательные комплексы — экспериментальная база федерального уровня

Таким образом, во ВНИИЭФ для исследований и оценки радиационной стойкости создана экспериментальная база установок, состоящая из сильноточных ускорителей электронов разного типа и импульсных ядерных реакторов, обеспечивающая воздействие ионизирующих излучений с различными амплитудно-временными и спектрально-энергетическими-угловыми характеристиками: мощность экспозиционной дозы тормозного излучения (ТИ) до 10^{13} Р с⁻¹ при длительности импульса $\sim 10^{-8}$ с, максимальная плотность потока нейтронов спектра деления до 10^{18} н (см² с)⁻¹ при флюенсе нейтронов с энергией $> 0,1$ МэВ до 10^{16} н см⁻² [79].

Возможность проведения исследований с использованием экспериментальной базы обеспечивалась развитием и совершенствованием существующих и разработкой новых детекторов, методов и методик проведения измерений характеристик высокоинтенсивных и высокодозных полей ионизирующих излучений.

Исходя из сказанного можно констатировать, что на сегодняшний день в ИЯРФ:

- имеется уникальная испытательная база по исследованиям и подтверждению РС широкой номенклатуры объектов — образцов техники (от микросхем до сложных многокомпонентных систем управления);
- создана и отлажена инфраструктура, обеспечивающая проведение работ по РС;
- отработаны методические основы постановки исследований для различных объектов и для различных режимов функционирования моделирующих установок;
- получены уникальные знания в области методологии расчётов, фундаментальных и теоретических обоснований физического моделирования поражающих радиационных факторов ЯВ и космического пространства.

8. Радиография

При создании подразделения экспериментальной физики в его составе была обозначена лаборатория рентгенографических исследований для разработки методов регистрации быстропротекающих процессов и проведения исследований по динамике взрыва. В течение многих

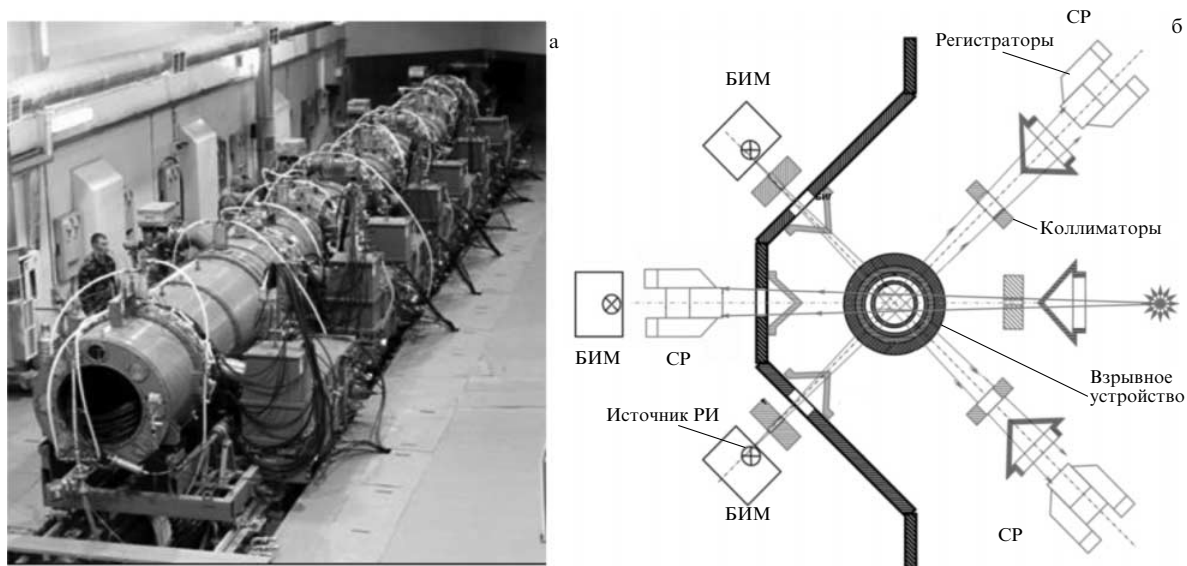


Рис. 20. (а) Общий вид ускорителя ЛИУ (фотография А.Е. Малеева). (б) Вариант включения установок радиографического комплекса. БИМ — бетатрон импульсный малогабаритный, СР — система регистрации.

лет лаборатория проводила разработку различных источников ионизирующего излучения (ускорители электронов прямого действия, импульсные рентгеновские аппараты, в том числе портативные, для методов экспресс-анализа, мощные источники типа "плазменный фокус" на основе сильноточных разрядов в газах и др.).

В условиях действия ДВЗЯИ возрастает актуальность проблемы создания мощных импульсных рентгенографических комплексов для исследований быстротекающих газодинамических процессов в объектах с большими массовыми толщинами.

В результате работ по созданию установок и комплексов нового поколения подразделениями ВНИИЭФ создан комплекс импульсных рентгенографических установок с современными средствами регистрации и обработки рентгеновских изображений.

В комплексе используется линейный индукционный ускоритель нового типа. Ускоритель (рис. 20а) по дозовым параметрам на порядок превосходит отечественные аналоги и приближается к лучшим зарубежным установкам подобного класса. Ускоряющая система (ЛИУ-Р-Т) построена на основе развитой в РФЯЦ–ВНИИЭФ технологии "безжелезных" линейных индукционных ускорителей с водоизолированными индукторами на базе ступенчатых формирующих линий с распределёнными параметрами. Это позволило вдвое повысить темп ускорения и увеличить в 5–10 раз ток электронного пучка по сравнению с током в наиболее мощных зарубежных рентгенографических установках (AIRIX (от франц. Accélérateur à Induction pour Radiographie pour l'Imagerie X), Драгон, Франция), выполненных по схеме классических линейных индукционных ускорителей с индукторами на ферромагнитных сердечниках.

На рисунке 20б показана возможная схема четырёхлучевого многоканального рентгенографического комплекса на базе трёх синхронно работающих бетатронов БИМ с максимальной энергией электронов 70 МэВ и линейного ускорителя ЛИУ (энергия электронов 12 МэВ). Комплекс оснащён современными многокадровыми

электронно-оптическими системами регистрации с выводом изображения практически в режиме реального времени, а также системами компьютерной радиографии на основе фотохромных экранов. Комплекс позволяет проводить исследования динамически развивающихся процессов в четырёх ракурсах (до 10 кадров в одном опыте) в объектах большой массовой толщины.

По числу лучей рентгенографирования и количеству кадров рентгеновского изображения объекта в одном опыте комплекс превосходит современный комплекс DARHT (Dual Axis Radiographic Hydrodynamic Test facility) в Лос-Аламосе.

9. Перспективные работы и направления деятельности

9.1. Создание Межведомственного центра комплексных радиационных исследований и испытаний

Межведомственный центр комплексных радиационных исследований и испытаний (МЦКИ) создаётся для проведения исследований и испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) и сопутствующих им эффектов.

Создание МЦКИ предполагает переход на новый уровень экспериментального моделирования воздействий. На исследуемые объекты должны воздействовать пучки заряженных частиц (с широким набором ионов — от протона до Вi), формируемые ионным ускорителем синхротронного типа. Поток частиц изменяющейся интенсивности должны воздействовать на объекты испытаний совместно с электронным и тормозным излучением, а также с возможным дополнительным одновременным воздействием электростатических разрядов.

Многообразие режимов экспериментальных исследований обеспечивается составом установок комплекса (рис. 21) и гибкими возможностями их автономных включений и совместного использования по заданным программам. Требования к основным параметрам бус-



Рис. 21. Состав оборудования и помещения МЦКИ.

Таблица 2. Бустерный ускоритель

Параметр	Значение	
Тип ускоряемых частиц	p	^{209}Bi
Энергия инжекции, МэВ на нуклон	7,5	3,5
Энергия при выпуске, МэВ на нуклон	от 7,5 до 700	от 3,5 до 36
Интенсивность, число частиц на импульс	от 10^4 до 10^{11}	от 10^3 до 10^8
Максимальная частота повторения, Гц	1	
Периметр кольца, м	88	

Таблица 3. Основной синхротрон

Параметр	Значение	
Тип ускоряемых частиц	p	^{209}Bi
Энергия инжекции, МэВ на нуклон	700	36
Энергия при выпуске, МэВ на нуклон	от 700 до 4000	от 36 до 400
Интенсивность, число частиц на импульс	от 10^4 до 10^{11}	от 10^3 до 10^8
Максимальная частота повторения, Гц	1	
Периметр кольца, м	168,5	

терного ускорителя (БУ) и основного синхротрона (ОС) приведены в табл. 2 и 3.

Создание МЦКИ ведётся в рамках широкой кооперации отечественных институтов и промышленных предприятий. В создании центра участвуют Институт ядерной физики (ИЯФ) им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск), Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (Московский инженерно-физический институт) (НИЯУ – МИФИ) (Москва), Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиха-

нова (ИТЭФ) Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (Москва), Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ – ВНИИТФ) (Снежинск), акционерное общество (АО) "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова" (НИИЭФА) (Санкт-Петербург), НИИЭФА-ЭНЕРГО (Санкт-Петербург), Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ) (Дубна), АО "Научно-исследова-

тельский институт технической физики и автоматизации" (НИИТФА) (Москва).

Надо отметить, что характер работ по созданию МЦКИ выходит за рамки объединения и координации усилий организаций. Работа требует освоения новых технологий (например, технологии получения высокодобротных резонансных структур с надёжным и долговечным покрытием), создание новых производственных мощностей (например, производства мощных высокочастотных (ВЧ) генераторов и усилителей), разработки сложных программных продуктов, сравнимых по возможностям с современными зарубежными программными пакетами.

9.2. Фабрика сверхтяжёлых элементов

В России лидером работ по синтезу сверхтяжёлых элементов является Международная межправительственная организация "Объединённый институт ядерных исследований". Здесь в реакциях слияния ионов кальция-48 ($Z = 20$) с мишенями из изотопов тяжёлых трансурановых элементов (плутоний-244, америций-243, кюрий-248, берклий-249, калифорний-249) были синтезированы новые элементы с порядковыми номерами 113, 114, 115, 116, 117 и 118 [85]. Принципиальная схема синтеза сверхтяжёлых элементов приведена на рис. 22.

Часть мишениных материалов была получена благодаря партнёрству с Ок-Риджской национальной лабораторией (США), часть — в результате совместных работ с организациями госкорпорации "Росатом": АО "Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов" (ГНЦ НИИАР), РФЯЦ–ВНИИЭФ, федеральное государственное предприятие комбинат "Электрохимприбор".

В настоящее время в рамках комплексной программы "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года", разработанной по указу Президента, ведутся работы по подготовке к синтезу новых элементов с $Z = 119$ и $Z = 120$ (в наиболее перспективных реакциях для элемента $Z = 119$ берклий-249 + титан-50, для элемента $Z = 120$ калифорний-251 + титан-50).

Участники реализации проекта и задачи, закреплённые за ними, показаны на рис. 23.

В ОИЯИ и на предприятиях госкорпорации "Росатом" предстоит значительная модернизация экспериментальной базы.

Так, в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ будет модернизирован ускорительный комплекс "Фабрика сверхтяжёлых элементов". В состав комплекса в настоящее время входят специализированный ускоритель ДЦ-280 [86], способный генерировать пучки ускоренных тяжёлых ионов, в 10–15 раз более интенсивные, чем на существующих ускорителях, и газонаполненный сепаратор нового поколения ГНС-2 для разделения продуктов ядерных реакций. В будущем комплекс будет оснащён новым ускорителем с сильноточным инжектором многозарядных ионов на базе сверхпроводящего ионного источника на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) с повышенной до 28 ГГц частотой накачки для получения высокоинтенсивных пучков ускоренных тяжёлых ионов, позволяющим повысить чувствительность экспериментов в 50–100 раз.

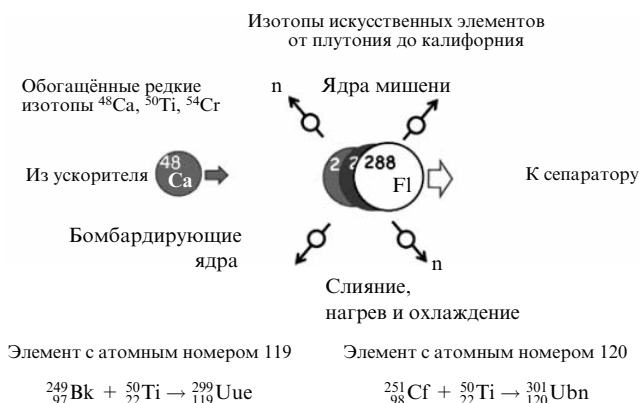


Рис. 22. Схема синтеза сверхтяжёлых элементов.

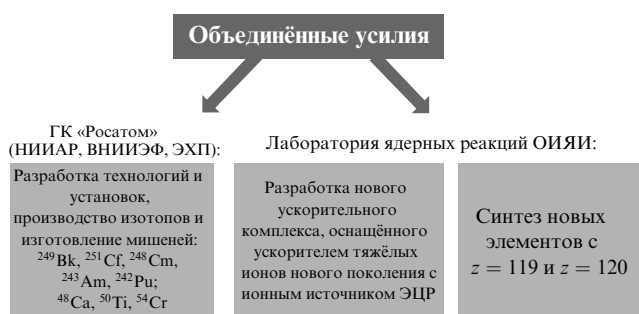


Рис. 23. Участники реализации проекта и закреплённые за ними задачи.

Ключевой проблемой синтеза новых элементов является наличие достаточного количества мишениных материалов (минимальное количество материала для приготовления мишени примерно 20 мг). Для решения этой задачи в организациях госкорпорации "Росатом" будет создан комплекс разделения изотопов на базе масс-сепаратора нового поколения (РФЯЦ–ВНИИЭФ), разработаны технологии и проведена наработка изотопов для синтеза сверхтяжёлых элементов (ГНЦ НИИАР, комбинат "Электрохимприбор").

10. Заключение

Для исследований и испытаний радиационной стойкости объектов военного назначения во ВНИИЭФ создан многозвенный научно-производственный комплекс федерального уровня, обеспечивающий полный цикл исследований, проектирования, изготовления, содержания и сопровождения многолетней эксплуатации моделирующих установок и облучательных комплексов. Отлажены инфраструктура, обеспечивающая проведение работ, и методические основы постановки исследований для различных объектов и для различных режимов функционирования моделирующих установок.

Именно это послужило основанием для решения по созданию во ВНИИЭФ Межведомственного центра комплексных радиационных исследований и испытаний.

Результаты научно-практической деятельности ИЯРФ по исследованиям природы взаимодействия излучений с веществом, методам регистрации излучений и изучению отклика материалов представляют собой значимый вклад в разработку методических основ использования

радиационных технологий в военной технике, промышленности, медицине, контроле соблюдения международных соглашений.

Список литературы

- Абрамович С Н, Антропов Г Н *Атом* (19) 4 (2002)
- Горбачев В М, Нефедов Ю Я *Атом* (19) 7 (2002)
- Горбачев В М, Нефедов Ю Я, в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Фомушкин Э Ф и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **67** (5) 694 (2004)
- Завьялов Н В и др., в сб. *65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии* Вып. 1 (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011) Научное издание в 2-х выпусках
- Горбачев В М и др., в сб. *65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии* Вып. 2 (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011) Научное издание в 2-х выпусках
- Zavialov N V et al. *AIP Conf. Proc.* **769** 1505 (2005)
- Генералов Л Н и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 15 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010)
- Завьялов Н В и др. *Атом* (50–51) (2011)
- Абрамович С Н и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* 165 (1977)
- Звенигородский А Г и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Воинов А М, Кувшинов М И *Атом* (19) 11 (2002)
- Никитин И А *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (2) 43 (2010)
- Воинов А М и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 15 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010)
- Кувшинов М И и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 15 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010)
- Малинкин А А и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (2) 113 (2010)
- Малинкин А А и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (2) 102 (2010)
- Малинкин А А и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (2) 95 (2010)
- Воронцов С В, Кувшинов М И *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (3) 3 (2013)
- Богданов В Н и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (3) 83 (2013)
- Кувшинов М И и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (3) 24 (2014)
- Кувшинов М И, Колесов В Ф "Нейтронные характеристики критической сборки из ^{239}Pu в δ -фазе без отражателя", в сб. *Фундаментальные свойства плутония. XI Международный семинар, Снежинск, 12–16 сентября 2011 г. Тезисы* (Снежинск: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011) с. 224
- Андрюшин И А и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Горбачев В М, Замятнин Ю С, Лбов А А *Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер* (М.: Атомиздат, 1976); Пер. на англ. яз.: Gorbachev V M, Zamyatin Y S, Lbov A A *Nuclear Reactions in Heavy Elements: a Data Handbook* (Oxford: Pergamon Press, 1979)
- Нефедов Ю Я, Пунин В Т *Методы диагностики параметров высокоинтенсивных импульсных источников ионизирующего излучения* (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010)
- Алексеев Г С и др., в сб. *Методы и средства физических измерений* Т. 1 (Под ред. В М Горбачева, Ю Я Нефедова) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008)
- Миронов Н К и др., в сб. *Методы и средства физических измерений* Т. 1 (Под ред. В М Горбачева, Ю Я Нефедова) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008)
- Алексеев Г С и др. *Приборы и техника эксперимента* (5) 36 (1983)
- Миронов Н К и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 15 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010)
- Антонов В Н и др., в сб. *Методы и средства физических измерений* Т. 1 (Под ред. В М Горбачева, Ю Я Нефедова) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008)
- Нефедов Ю Я, Усенко П Л *Приборы и техника эксперимента* (1) 113 (2016); Nefedov Yu Ya, Usenko P L *Instrum. Exp. Tech.* **59** 115 (2016)
- Нефедов Ю Я и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Весновский С П, Созник М П *Атом* (19) 28 (2002)
- Безотосный В и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы* (22) 21 (1976)
- Горбачев В М и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (Спецвыпуск) 101 (1997)
- Савин М В и др. *Атомная энергия* **49** 236 (1980); Savin M V et al. *Sov. At. Energy* **49** 686 (1981)
- Савин М В и др., в сб. *Ядерно-физические исследования в СССР* Вып. 24 (М.: Атомиздат, 1977)
- Нефедов Ю Я и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Нефедов Ю Я и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы* (2) 47 (1996)
- Савин М В и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Лазарев Л И, Дзюба Б М, в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Генералов Л Н и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 15 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010)
- Калуцкий А В и др., в сб. *Методы и средства физических измерений* Т. 1 (Под ред. В М Горбачева, Ю Я Нефедова) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008)
- Горелов В П и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (2) 3 (2010)
- Мельников С П, Сизов А Н, Синянский А А *Лазеры с ядерной накачкой* (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008) монография
- Абрамович С Н, Звенигородский А Г *Ядерная физика и инжиниринг* **4** (11–12) 1097 (2013)
- Абрамович С Н, Гужовский Б Я, Лазарев Л М *ЭЧАЯ* **23** 305 (1992)
- Лазарев Л М *Теория пороговых явлений и спектроскопия лёгких ядер* (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2007)
- Абрамович С Н и др. *Ядерно-физические константы* (М.: ЦНИИАтоминформ, 1989)
- Генералов Л Н и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **84** 1774 (2020); Generalov L N et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **84** 1511 (2020)
- Генералов Л Н, Селянкина С М *Изв. РАН. Сер. физ.* **84** 1430 (2020); Generalov L N, Selyankina S M *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **84** 1224 (2020)
- Генералов Л Н, Абрамович С Н, Селянкина С М *Изв. РАН. Сер. физ.* **81** 717 (2017); Generalov L N, Abramovich S N, Selyankina S M *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **81** 644 (2017)
- Вихлянцева О П и др. *Ядерная физика и инжиниринг* **7** (4) 326 (2016)
- Генералов Л Н и др. *Ядерная физика и инжиниринг* **7** (4) 374 (2016)
- Колесов В Ф и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
- Колесов В Ф и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые крит сборки* (1) 14 (1985)
- Колесов В Ф и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые крит сборки* (1) 3 (1988)
- Воинов М А и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика атомных реакторов* (2) 21 (1992)
- Колесов В Ф и др. *Динамика ядерных реакторов* (Под ред. Я В Шевелева) (М.: Энергоатомиздат, 1990)
- Колесов В Ф *Апериодические импульсные реакторы* (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1999); Пер. на англ. яз.: Kolesov V F *Aperiodic Pulse Reactors* Vol. 1, 2 (Sarov: RFNC–VNIIEF, 2006); Колесов В Ф *Апериодические импульсные реакторы* Т. 1, 2 (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2007)
- Павловский А И, Колесов В Ф и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (3) 3 (1992)
- Кувшинов М И и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 15 (Гл. ред. Р И Ильякаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010) с. 201
- Колесов В Ф и др. *Атомная энергия* **92** 42 (2002); Kolesov V F et al. *Atomic Energy* **92** 41 (2002)

64. Колесов В Ф, Гужовский Б Я *Атомная энергия* **76** (1) 71 (1994); Kolesov V F, Guzhovskii B Ya *Atomic Energy* **76** 67 (1994)
65. Колесов В Ф и др., в сб. *65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии* Вып. 1 (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011) с. 136, Научное издание, в 2-х выпусках
66. Колесов В Ф, Хоружий В Х *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (3) 31 (2012)
67. Кошелев А С, Хоружий В Х *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (3) 65 (2013)
68. Воинов М А и др. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (4) 5 (2017)
69. Устиненко В А и др. *Атомная энергия* **116** (1) 20 (2014); Ustinenko V A et al. *Atomic Energy* **116** 27 (2014)
70. Колесов В Ф *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов* (3) 106 (2014)
71. Пунин В Т и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Илькаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001) с. 356
72. Пунин В Т *Вооружение. Политика. Конверсия* (1) 13 (2003)
73. Pavloskij A I et al. *Приборы и техника эксперимента* **41** (2) 13 (1998); Pavloskii A I et al. *Instrum. Exp. Tech.* **41** 154 (1998)
74. Гордеев В С и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Илькаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001) с. 390
75. Павловский А И и др., в сб. *Релятивистская высокочастотная электроника* Вып. 7 (Н. Новгород: ИПФ РАН, 1992) с. 81
76. Герасимов А И и др. *Атом* (19) 14 (2002)
77. Пунин В Т, Гордеев В С и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 15 (Гл. ред. Р И Илькаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010) с. 226
78. Босамыкин В С и др., в сб. *Физика импульсных источников нейтронов. Международный семинар по импульсным источникам нейтронов, 14–16 июня 1994, Дубна, Россия* (Дубна: ОИЯИ, 1995)
79. Завьялов Н В и др., в сб. *65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии* Вып. 1 (Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011) с. 165, в 2-х выпусках
80. Гордеев В С и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Илькаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
81. Эльяш С Л и др., в сб. *Мощная импульсная электрофизика. Международная конф. XIV Харитоновские тематические научные чтения, 12 марта 2012 г.* (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2013) с. 117
82. Гордеев В С и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 1 (Гл. ред. Р И Илькаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001)
83. Гордеев В С, в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 4 (Гл. ред. Р И Илькаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2003)
84. Гордеев В С и др., в сб. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* Вып. 19, Ч. 1 (Гл. ред. Р И Илькаев) (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2014)
85. Оганесян Ю Ц, Дмитриев С Н *Успехи химии* **85** 901 (2016); Oganessian Yu Ts, Dmitriev S N *Russ. Chem. Rev.* **85** 901 (2016)
86. Гульбекян Г Г и др. *Письма в ЭЧАЯ* **16** 653 (2019); Gulbekian G G et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **16** 866 (2019)

RFNC–VNIIEF research facilities aimed at experimental acquisition of basic and applied knowledge in the fields of nuclear, radiation, and fast-process physics (on the 75th anniversary of the Atomic industry)

N.V. Zavyalov

*Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics, prosp. Mira 37, 607190 Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation
E-mail: NVZavyalov@vniief.ru*

Described are problems in the field of nuclear physics, for the solution of which a subdivision of experimental physics was created during the implementation of the atomic project as part of Design Bureau 11 (KB11). This subdivision is now the Institute of Nuclear and Radiation Physics (INRF)—the center of competence of the Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC–VNIIEF) in the field of experimental nuclear and radiation physics. The paper outlines the transformation of these problems with time and the formation of new areas of activity based on them. Data on the current state of the development of the experimental base of VNIIEF (YARF) are presented, as are prospects and plans. The paper is an extended version of a report at the session of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences dedicated to the 75th anniversary of the Atomic industry, December 7, 2020.

Keywords: nuclear and radiation physics, nuclear reactions, interaction cross sections, recording of ionizing radiation, ionizing radiation sources, breeding assemblies, pulsed nuclear reactors, electron accelerators, radiography

PACS numbers: **28.41. –i, 28.70. +y**

Bibliography — 86 references

Received 16 February 2021

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (5) 547–563 (2022)

Physics – Uspekhi **65** (5) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.12.038933>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.12.038933>