

ТЕХНИКА НАИВЫСШИХ ДОСТИЖЕНИЙ ОБСУЖДЕНИЕ НАУЧНОГО СООБЩЕНИЯ

© 2022 г. С. С. Попов (составитель)

Журнал “Вестник Российской академии наук”, Москва, Россия

E-mail: ssp1950@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.

После доработки 24.12.2021 г.

Принята к публикации 28.12.2021 г.

Для проникновения в тайны мироздания физики используют всё усложняющийся инструментарий. Растут не только масштабы ускорительных установок, но и стоимость их сооружения. Финансовых возможностей одной страны для постройки новейших физических комплексов уже недостаточно, поэтому для их создания передовые страны объединяют свои усилия в рамках международных проектов. В них участвует и Россия. Но в современных ускорителях нуждаются не только учёные. Эта техника с успехом применяется в самых разных отраслях, в том числе в промышленности и в медицине. Какие перспективные проекты для решения задач фундаментальной науки, в частности физики ядра и физики элементарных частиц, необходимо реализовать в нашей стране в ближайшие десять лет? Как обстоят дела с разработками для медицинского применения? Почему наши онкологические центры вынуждены закупать ускорители иностранного производства? Эти и другие вопросы обсуждались на одном из заседаний президиума РАН.

Ключевые слова: ускорители и ускорительная техника, источники синхротронного излучения, лазеры на свободных электронах, ионно-протонная терапия, линейные адронные ускорители, NICA, СИЛА, СКИФ, DARIA, DERICA, Супер чарм-тау фабрика.

DOI: 10.31857/S0869587322030124

Открывая обсуждение научного вопроса “Развитие ускорителей заряженных частиц в России и в мире для фундаментальной науки, медицины и высоких технологий” президент РАН **А.М. Сергеев** напомнил, что ускорительная техника как мощный инструмент познания микромира, открытия и изучения новых частиц и взаимодействий с момента своего рождения (а это менее века) прошла впечатляющий путь. Это касается, например, её размеров и мощности. Если первый циклотрон (циклический ускоритель электронов), созданный американскими физиками Э. Лоуренсом и М. Ливингстоном в 1930 г., имел диаметр всего 4 дюйма (около 10 см) и был рассчитан на энергию до 80 кэВ, то современные линейные ускорители достигают километровой длины, а, например, окружность Большого адронного коллайдера составляет чуть менее 27 км, энергия же установок возросла до десятков и сотен гигаэлектронвольт. Рост масштабов установок диктуется логикой развития науки, стремлением учёных расширить горизонты познания. Сегодня ускорители широко используются не только в физических экспериментах, но и в промышленности, сельском хозяйстве, медицине.

Одним из важнейших научных направлений, отметил **А.М. Сергеев**, становятся в последние годы синхротронные и нейтронные исследования, имеющие множество прикладных применений. В нашей стране принята масштабная федеральная программа их развития до 2027 г.

Оценить сегодняшний уровень ускорительной техники в России, перспективы её совершенствования и предстояло участникам заседания президиума РАН.

В научном сообщении, с которым выступил академик РАН **Б.Ю. Шарков**, были приведены показательные данные. В мире, судя по ориентировочным оценкам, функционируют около 42 тыс. ускорителей (28 тыс. ускорителей электронов, 14 тыс. ускорителей протонов и ионов). 1200 из них используются в научных целях, 27 тыс. в промышленности и сельском хозяйстве, более 12 тыс. в медицине. Доля России в мировом объёме невелика – в нашей стране действуют 460 ускорительных установок (170 в научных учреждениях, 100 в промышленности, 150 в медицине, 40 в таможенных терминалах). К сожалению, большая их часть, особенно в промышленности и медицине, импортного производства. Что касается ис-

пользования ускорительной техники в научных целях, то здесь ситуация иная. Россия, по мнению академика Шаркова, занимает в этой области весьма достойную нишу. Передовые позиции, завоеванные трудом и талантом нескольких поколений советских и российских учёных и инженеров, необходимо сохранить. В докладе, в содокладах и выступлениях прозвучали предложения относительно того, как не растерять накопленный капитал и нарастить его.

Об источниках синхротронного излучения¹ четвёртого поколения и лазерах на свободных электронах как основе современной кристаллографии и материаловедения рассказал вице-президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», доктор физико-математических наук А.Е. Благов. Содоклад он начал с упоминания двух неординарных событий 2021 года. Первое из них – энергетический пуск нейтронного реактора «ПИК» в Гатчине под Санкт-Петербургом, самого мощного полномочного исследовательского реактора в мире (его строительство было начато в 1976 г., но по разным причинам растянулось на четыре десятилетия). Второе событие – физический пуск в Курчатовском институте Токамака Т-15 МД – термоядерной установки с уникальными параметрами. В 2022 г. планируется выход её на проектные характеристики – нагрев плазмы до 100 млн градусов С.

«Почему мы сейчас проявляем большой интерес к лазерам на свободных электронах, то есть к источникам синхротронного излучения четвёртого поколения?» – задался вопросом докладчик и, отвечая на него, продемонстрировал на слайде возможности этого инструмента, позволяющего восстановить атомную структуру неупорядоченных образцов, что, по сути, открывает новую эру в материаловедении. Исследователи смогут увидеть расположение атомов в пространстве, влияние их связей на свойства материалов. Обладая знанием атомных и молекулярных механизмов, можно создавать новые материалы и изделия.

Докладчик напомнил, что теоретические основы создания рентгеновского лазера на свободных электронах были заложены в конце 1970-х – начале 1980-х годов в работах новосибирских физиков Е.Л. Салдина, А.М. Кондратенко, Я.С. Дербенёва. Реализованные на основе этих идей источники синхротронного излучения четвёртого поколения значительно превзошли предшественников по своим характеристикам, позволив исследовать биологические объекты на недостижимом ранее уровне. За счёт значительного увеличения светимости и сокращения длительности

светового импульса учёные получили возможность изучать трёхмерные структуры белков, взаимодействия молекул и атомов, что важно при создании новых лекарств. Ещё совсем недавно визуализация объектов такого размера казалась фантастикой. Как отметил Александр Евгеньевич, создатели установок нового поколения за последние 10 лет добились ощутимых результатов: от уровня разрешения примерно 100 нм пришли к разрешению 2 нм, а это уже атомарная область. Перед учёными открылась возможность изучения структуры мембранных белков, очень важных для создания лекарств. Докладчик упомянул, что практически 50% современных лекарственных средств оперируют именно с мембранными белками, воздействуя на их активность, хотя структура 99% известных мембранных белков до сих пор остаётся белым пятном. Короткие вспышки рентгеновского лазера позволяют не только изучать структуру белка, но и видеть её динамику в пикосекундных временных масштабах.

В ходе выполнения Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований в стране будет создана сетевая синхротронная и нейтронная инфраструктура, включающая установки класса мегасайенс, организована подготовка кадров. Программа нацеливает её участников на получение прорывных научных результатов и последующий их трансфер в технологии, в том числе в такой области, как ядерная медицина, должна способствовать развитию регионов, включая образование, науку, промышленность.

А.Е. Благов упомянул несколько реализуемых проектов. Помимо упоминавшегося реактора ПИК, это синхротронно-лазерный комплекс СИЛА (6 ГэВ), источник нейтронов безреакторного типа, который будет создан в Протвине на базе ускорителя У-70, синхротрон СКИФ (3 ГэВ), синхротрон Дальневосточного федерального университета на острове Русский. Полностью модернизируется ныне действующий источник синхротронного излучения в Курчатовском институте, обновляются все его инженерные и ускорительные системы.

Программа предполагает организацию ответственного научно-образовательного центра ядерной медицины с распределённой инфраструктурой, включающей центр углеродной терапии на базе ускорителя У-70, радиоизотопные комплексы в Москве и в Протвине, которые позволят создавать широкий спектр радиофармпрепаратов. Планируется также формирование онкоофтальмологического центра на базе циклотрона Ц-80 в Гатчине, типового центра протонной лучевой терапии в Москве с последующим открытием подобных центров на территории Российской Федерации. Важная составляющая успешной реализации программы – организация высокотехнологического производства всех компонентов систем в

¹ Синхротронное излучение – излучение электромагнитных волн заряженными частицами, движущимися с релятивистскими, то есть близкими к скорости света, скоростями в магнитном поле, искривляющем их траектории.

Новосибирске, в Протвине, в Москве. Потенциальный кандидат на включение в программу – накопительный комплекс “Зеленоград”. Фактически это рабочий синхротрон, его задача – поддержка микроэлектронных технологий.

Главный научный сотрудник Объединённого института ядерных исследований академик РАН **И.Н. Мешков** в своём сообщении рассказал о ходе реализации в Дубне мегасайенс проекта – первого в России коллайдера тяжёлых ионов и поляризованных протонов (Nuclotron-based Ion Collider fAcility – NICA). Предполагается запустить его до конца 2022 г. Этот ускорительный комплекс, оборудованный двумя детекторами (Multi Purpose Detector – MPD и Spin Physics Detector – SPD), нацелен на проведение экспериментальных исследований умеренно горячей, но максимально плотной барионной материи с образованием в ней так называемой “смешанной фазы”, а также изучения природы спина, то есть собственного момента количества движения элементарных частиц и проверки кварк-глюонной гипотезы (по современным представлениям величина “момент спина нуклона” определяется его кварк-глюонной структурой и значениями их орбитальных моментов). Коллайдер NICA будет оснащён устройствами управления спином частиц, так называемыми сибирскими змейками, и измерителями направления спина (поляриметрами).

Развитие теории сильного взаимодействия показало, что максимальная плотность барионной, то есть ядерной, или сильновзаимодействующей материи достигается в столкновениях тяжёлых ядер урана, висмута, золота при умеренно релятивистской энергии – порядка 10 ГэВ на нуклон в системе центра масс сталкивающихся ядер. При этом температура образующейся кварк-глюонной плазмы соответствует этому значению энергии – порядка 10^{12} К. При столкновении тяжёлых ядер умеренно релятивистской энергии, как гласит теория, происходит фазовый переход 1-го рода с образованием кварк-глюонной плазмы. Граница между двумя состояниями расплывчатая, это так называемая смешанная фаза – смесь кварков, глюонов и барионов (нуклонов и мезонов). При этом возможно рождение новых частиц, обладающих свойствами, которые не наблюдаются при меньшей барионной плотности. Считается, что смешанная фаза характерна для ранней стадии формирования Вселенной (порядка 1 микросекунды после Большого взрыва). Это и привлекает внимание исследователей. Таким образом, тяжёлые ядра, ускоренные до умеренно релятивистской энергии – всё, что нужно для эксперимента. Правда, как отметил И.Н. Мешков, нужна ещё светимость коллайдера порядка 10^{27} см⁻² · с⁻¹. Это, пожалуй, главная проблема всех экспериментов по поиску смешанной фазы.

Большая часть сложнейшего оборудования коллайдера спроектирована и произведена в России: сверхпроводящие магниты и кабели – в Дубне, ускоряющие системы и системы электронного охлаждения – в Новосибирске (ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера). Наиболее сложный элемент многоцелевого детектора – сверхпроводящий соленоид – изготовлен в Словакии и Италии, а в Дубну доставлен из Генуи водным путём.

Проектом предусмотрена и широкая программа прикладных исследований на пучках заряженных частиц. Диапазон задач – от микроэлектроники до медицины и радиобиологии.

NICA открывает уникальные и качественно новые возможности проведения исследований фундаментального и прикладного характера с использованием широкого массового спектра ионных пучков в диапазоне энергий от единиц МэВ/нуклон до единиц ГэВ/нуклон. Конструкция комплекса допускает его дальнейшее развитие. Например, дополнение модой электрон-ионного коллайдера, ориентированного на проведение нового класса экспериментальных исследований в области ядерной физики и физики частиц.

Заместитель директора по научной работе Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН доктор физико-математических наук **Е.Б. Левищев** в своём содокладе представил работы, ведущиеся в Новосибирске на циклических ускорителях электронов, заметив, что в России только ИЯФ и Курчатовский институт проектируют и эксплуатируют такие установки. Институт ядерной физики – один из пионеров создания метода встречных пучков. В 1960-х годах этот метод успешно применялся всего в трёх лабораториях мира, и одна из них – в ИЯФе. В настоящее время в институте действуют два электрон-позитронных коллайдера. Это разработанный ещё в 1970-х годах ВЭПП-4М (диаметр около 400 м, рассчитан на энергию до 5.5 ГэВ). Несмотря на солидный возраст комплекса, его физико-технические параметры позволяют и сегодня проводить уникальные эксперименты. Например, здесь реализована система измерения энергии частиц методом резонансной деполяризации с относительной погрешностью до 10^{-7} , не достигнутой ни в одной другой лаборатории мира. Такая методика даёт возможность измерять массы элементарных частиц с чрезвычайно высокой точностью. В экспериментах по физике высоких энергий, проводившихся на комплексе ВЭПП-4, с рекордной точностью измерены массы J/ψ -, $\psi(2s)$ - (эти результаты входят в десятку наиболее точно известных масс элементарных частиц, измеренных за всю историю физики) и $\psi(3770)$ -мезонов, а также масса тау-лептона. Масса тау-лептона была определена с лучшей в мире точностью, что стало значительным вкладом в определение пределов применимости “стандартной мо-

дели” – теории, которая сегодня наиболее полно описывает фундаментальные свойства материи и элементарных частиц.

Кроме физики высоких энергий, на пучках синхротронного излучения проводятся фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники: индустрия наносистем и материалов, экология и рациональное природопользование, энергетика и энергосбережение, информационно-телекоммуникационные системы и электроника. В экспериментах на установке ВЭПП-4 участвуют 30 российских и зарубежных организаций, в том числе институты РАН из Новосибирска, Екатеринбург, Красноярск, Томск, Санкт-Петербурга, Москвы, институты из Германии, Франции, Италии, Швейцарии, Испании, США, Японии и Южной Кореи.

Более современный коллайдер – ВЭПП-2000 (периметр 24 м, энергия до 1 ГэВ), в нём реализован оригинальный метод круглых пучков, позволивший достигнуть очень высокой светимости. Программы экспериментов на ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 на ближайšie годы утверждены, но новосибирских физиков волнует вопрос: какая судьба ожидает эти установки после завершения программ, не погибнет ли знаменитая научная школа академика Г.И. Будкера, формировавшаяся на протяжении десятилетий?

С учётом того, что для создания машины мегакласса требуется около 10 лет, в ИЯФ с 2006 г. прорабатывается проект Супер чарм-тау фабрики, или Супер С-тау фабрики. Это ускорительный комплекс, предназначенный для проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками в диапазоне энергии от 2 до 7 ГэВ с беспрецедентной светимостью – $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, на два порядка превышающей достигнутую сегодня в мире в этом диапазоне энергии. Концепция коллайдера базируется на новом методе повышения светимости – CrabWaist, предложенном и разработанном специалистами INFN (Италия) и ИЯФ СО РАН.

В 2011 г. проект Супер С-тау фабрики вошёл в число шести проектов класса мегасайенс, одобренных правительственной комиссией для реализации на территории Российской Федерации. В августе 2017 г. между Минобрнауки России и ИЯФ СО РАН подписано соглашение о работах по созданию научно-технического задела для реализации проекта, и в последние 5–7 лет в ИЯФ СО РАН ведётся активная работа в этом направлении. По словам Е.Б. Левичева, “поскольку в России нет опыта работы с многими густками или такими большими токами, для уменьшения риска мы предложили машину с очень необычной конфигурацией периметром всего 30 м, которую условно называем эмитрон. В нём электронные и позитронные пучки будут встречаться не в

лоб, а догоняя друг друга. На такой установке мы предполагаем получить атом димюония – экзотического лептонного атома, представляющего собой связанное состояние положительного и отрицательного мюонов $\mu+\mu^-$. Для быстрого освоения новых ускорительных технологий и предзназначен эмитрон, ИЯФ надеется на поддержку этого проекта со стороны РАН”.

И наконец, проект Центра коллективного пользования СКИФ, рассчитанный на энергию 3 ГэВ и рекордную численную характеристику пучка (физики называют её эмиттансом). Первый пучок частиц на установке предполагается получить в конце 2023 г., а уже в конце 2024 г. здесь должны заработать 6 станций. Стройка началась в августе 2021 г., ИЯФ создаёт оборудование – магниты, вакуумные камеры и т.д.

“Синхротронный комплекс четвёртого поколения с лазером на свободных электронах СИЛА” – тема выступления и.о. руководителя Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований НИЦ “Курчатовский институт” кандидата физико-математических наук **Н.В. Марченко**.

Уникальность установки СИЛА, по мнению её создателей, в комбинации синхротронного источника четвёртого поколения и рентгеновского лазера на свободных электронах, по сути, она вберёт в себя наивысшие достижения в области генерации электромагнитного синхротронного излучения. Параметры комплекса на новой площадке Курчатовского института в подмосковном Протвине: периметр более 1100 м, энергия в накопительном кольце 6 ГэВ, эмиттанс ~75 пикометров на радиан, спектр излучения – от 200 эВ до сотен кэВ, экспериментальных станций предполагается более пятидесяти. В состав комплекса войдут два источника – фотопушка для инъекции в рентгеновский лазер на свободных электронах (его длина порядка 800 м) и термопушка – источник электронов, предназначенный для инъекции в основное накопительное кольцо. За ним следуют линейный ускоритель на 6 ГэВ и развилка: электроны направляются либо в кольцо, обеспечивая его источником синхротронного излучения, либо в ондулятор² лазера на свободных электронах и поступают на его экспериментальные станции. Совместно с партнёрами организациями разрабатываются головные образцы систем и узлов источника электронов, линейного ускорителя, а также магнитные системы. В экспериментальных станциях предполагается максимально использовать уникальные свойства пучка, то есть его когерентность и возможность исследовать полностью неупорядоченные объекты, уста-

² Ондулятор – устройство для генерации когерентного синхротронного излучения в электронном накопителе-синхротроне.

навливая их структуру. Открываются широчайшие возможности изучения белков, потому что не все белки можно кристаллизовать. Высокая яркость излучения обеспечит многомасштабную визуализацию. Станет возможным просвечивание даже крупных объектов для промышленных применений. Рентгеновский лазер на свободных электронах позволит проводить исследования с временным разрешением.

Срок реализации проекта – текущее десятилетие и начало следующего. До 2024 г. планируется завершить все проектные работы и разработать головные образцы узлов и систем ускорителя, чтобы затем в несколько этапов его построить. До 2027 г. – создать кольцевой ускоритель экспериментальной станции первой очереди, до 2030 г. – рентгеновский лазер на свободных электронах. До конца 2032 г. – создать экспериментальные станции второй очереди, включая станции лазера на свободных электронах. Завершая выступление, Н.В. Марченков подчеркнул, что создание комплекса СИЛА, будущие эксперименты с его использованием обеспечат лидирующие позиции нашей страны в области синхротронных исследований на годы и годы вперед, а также разработку прорывных технологий, формирующих принципиально новый базис российской экономики.

Доцент кафедры электрофизических установок Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ” доктор физико-математических наук **С.М. Полозов** представил обзор “Линейные ускорители электронов прикладного назначения”.

По его мнению, одна из наиболее благополучных областей производства ускорительной техники в России – линейные ускорители электронов технологического назначения. Их выпускают несколько государственных и частных компаний, развито частно-государственное партнёрство, ускорители успешно поставляются как на внутренний, так и на внешний рынок. Так, научно-производственное предприятие “Корад” (Санкт-Петербург) и МИФИ разработали новую линейку ускорителей на энергию от 2 до 10 МэВ, среднюю мощность в пучке до 15 кВт и КПД “от розетки” более 20%, что превосходит зарубежные аналоги. В качестве примера: в начале сентября во Вьетнаме завершились приёмо-сдаточные испытания ускорителя, предназначенного для стерилизации фруктов. Готовится к отправке в Магаданскую область ускоритель, предназначенный для гамма-активационного анализа содержания золота в породе, новая технология детектирования в сочетании с прецизионными параметрами пучка позволяет определять концентрации до 0.1 г драгоценного металла на тонну породы.

В России и за рубежом успешно работают ускорители, разработанные в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Резонансные и электростатические

установки используются для модификации полимеров, иммобилизации технологических отходов, радиационной стерилизации пищевых продуктов и медицинских изделий. Лаборатория электронных ускорителей МГУ совместно с научно-производственным предприятием “Торий” и компанией “Скантроник Системс” освоили серийное производство компактных ускорителей на 5–6 МэВ для досмотра фур и грузовых контейнеров. Единично производятся ускорители для стерилизации пищевой продукции. Хуже обстоят дела у ещё двух традиционных разработчиков ускорителей электронов. В Московском радиотехническом институте РАН около 10 лет назад был разработан удачный проект ускорителя на 5 МэВ “Радуга”, предназначенного для дезинсекции и дизбактеризации сельхозпродукции, но в серию он не пошёл. НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА) госкорпорации “Росатом” продолжает позиционировать себя в качестве разработчика ускорителей электронов для стерилизации и промышленной дефектоскопии, однако об успешно реализованных за последние 10 лет проектах неизвестно.

Сложная ситуация сложилась с ускорителями электронов, предназначенными для дистанционной лучевой терапии. Несмотря на то, что российские онкологические центры укомплектованы современными установками на 60–70% необходимой потребности, а также постоянную опасность отказа западных поставщиков от гарантийного обслуживания оборудования, работы по этому направлению идут очень тяжело. Ещё в 1990-х годах в НИИЭФА планировалось начать производство установок “Элус” по лицензии компании Phillips, но оно так и не стало массовым. Кроме того, многолетневый коллиматор собственной разработки не обеспечивал достаточно эффективной конверсии электронов в гамма-кванты. В последние годы на этом рынке активизировались структуры “Росатома”. НИИ технической физики и автоматизации совместно с МГУ и при поддержке НМИЦ радиологии разработали ускоритель “Оникс” на 6 МэВ, который в сентябре 2021 г., наконец, запущен и начал выходить на проектные параметры. Второй проект того же института – ускоритель на 6 МэВ “Торус” разрабатывается совместно с МИФИ. На государственном уровне, считает С.М. Полозов, этому важнейшему для здравоохранения направлению не уделяется достаточного внимания.

Вторая часть обзора была посвящена использованию сверхпроводящих магнитов и ускоряющих резонаторов. Технологии, необходимые для производства сверхпроводящих резонаторов, наиболее интенсивно развивались в мире в 1990–2000 гг., а в России ими, к сожалению, не занимались. Но в последние годы ситуация меняется. В современных ускорителях научного на-

значения (драйверах для генераторов экзотических изотопов, лазеров на свободных электронах, нейтронных генераторов на реакциях скалывания и т.д.) сверхпроводящие резонаторы, можно сказать, обязательны, появляются проекты технологических ускорителей со сверхпроводящими ускоряющими системами. В 2016 г. была создана коллаборация ОИЯИ, МИФИ, белорусского Физико-технического института и Научно-практического центра по материаловедению Национальной академии наук Белоруссии, Белорусского государственного университета, которая к настоящему времени освоила необходимые технологии разработки и штучного производства сверхпроводящих резонаторов из цельнолиствого ниобия. Более благополучна ситуация со сверхпроводящими магнитами. В ОИЯИ развёрнуто крупносерийное производство магнитов для NICA и FAIR, в Дубне начаты работы по использованию высокотемпературных сверхпроводников для производства импульсных магнитов. В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН освоено производство сверхпроводящих ондуляторов и вигглеров для источников синхротронного излучения. Но несмотря на то, что в последние 5–7 лет ощутил прогресс в выпуске ускорителей прикладного назначения, ещё предстоит выполнить большой объём работ для обеспечения потребностей страны в сверхпроводящих ускоряющих резонаторах, а затем и для вывода производимых магнитов и резонаторов на международный рынок.

С сообщением “Синхротронный комплекс Российского федерального ядерного центра ВНИИ экспериментальной физики” выступил директор Института ядерной и радиационной физики РФЯЦ ВНИИЭФ доктор технических наук **Н.В. Завьялов**. Для прогнозирования последствий ядерного взрыва учёными этого ведущего научного центра созданы моделирующие установки на базе сильноточных индукционных ускорителей, импульсных периодических реакторов, резонансных ускорителей и ускорителей прямого действия, гамма-установок. Облучательные комплексы, реализованные на основе линейных индукционных ускорителей, импульсно-периодических реакторов, не имеют аналогов в мире.

С самого начала осуществления атомного проекта во ВНИИЭФ уделялось большое внимание формированию экспериментальной базы, разработке научно-методических основ рентгенографии. На базе трёхлучевого импульсного бетатрона здесь создан рентгеновский комплекс для изучения экстремальных состояний вещества. Недавно он дооснащён сильноточным индукционным ускорителем. Ведутся работы по увеличению энергии, улучшению фокального пятна и многоимпульсности на линейном индукционном ускорителе. Для моделирования воздействия мягкого рентгеновского излучения несколько лет на-

зад принято решение о создании мультитераваттной установки “Гамма”. В настоящее время она уже выведена на проектные параметры.

Планируется создание электронного ускорителя мощностью до 300 кВт, построен его полномасштабный прототип. На основании постановления Правительства РФ начата реализация комплекса для обеспечения в лабораторных условиях всестороннего моделирования последствий воздействия излучения на электронную компонентную базу и приборы. Задача – повысить их радиационную стойкость, увеличив тем самым сроки эксплуатации космической техники.

Базовой установкой во ВНИИЭФе служит синхротрон, который позволяет экспериментировать с любым из элементов Периодической таблицы Менделеева. Сегодня он дооснащается многочисленными установками, базирующимися на линейных резонансных ускорителях, ускорителях прямого действия, гамма-источниках для изучения факторов воздействия на материалы, в том числе и космического излучения. Обновляются контрольно-измерительное оборудование, системы входного контроля, сбора, обработки и передачи большого массива данных в рамках создаваемого в нашей стране межведомственного распределённого центра радиационных испытаний. На 2025 г. запланирован вывод обновлённого комплекса на предполагаемые параметры, на 2027 г. – завершение работ. С запуском бустера в 2025 г. появляется возможность создания лечебного комплекса для протонно-лучевой и адронной терапии. Устойчивая кооперация ведущих ускорительных центров страны позволяет реализовать планы, предложенные учёными ВНИИЭФа, подчеркнул в заключение Н.В. Завьялов.

Взявший затем слово почётный научный руководитель ВНИИЭФа академик РАН **Р.И. Ильяев** отметил, что учёные, занятые в ядерном оружии отом комплексе страны, решают очень сложную задачу: необходимо обеспечивать надёжность, безопасность и эффективность ядерного оружия в течение десятилетий без натуральных испытаний. “Таких экспериментов над физиками в мире ещё не ставилось”, – пошутил Радий Иванович, а если говорить серьёзно, то проблема действительно сложнейшая. 30 лет действует договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний и, надо надеяться, ещё многие-многие десятилетия будет действовать, поскольку возобновлять их не следует. В этих условиях надежды возлагаются на квалифицированный научный и инженерный персонал, отличные физические установки, мощные вычислительные центры и качественные математические программы.

“Мы помним и ценим, что наш ядерный центр создавался при активнейшем участии Академии наук. И в нынешних условиях мы, учёные Росатома, заинтересованы в кооперации с РАН, нужно

укреплять и расширять наше сотрудничество”, – таково мнение академика Илькаева. Он высказал мысль, что наряду с оборонными разработками в ядерных центрах нужно активнее развивать и гражданские, привлекая к решению новых задач молодёжь. Такая практика существует в американском Лос-Аламосе, где ежегодно набирают 300 молодых учёных со степенью PhD, заключают с ними трёхгодичный контракт, а после его окончания лучшим 100 предлагают продолжить работу в Лос-Аламосе. Подобные меры предпринимаются и в России, о чём говорит решение о создании Национального центра физики и математики в Сарове. Учёные ВНИИЭФа надеются на помощь РАН в его формировании.

На проблемы использования ускорителей в медицине обратил внимание участник заседания генеральный директор Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России академик РАН **А.Д. Каприн**. Лучевая терапия – мощное оружие онкологов, но в нашей стране оно, к сожалению, иностранного производства, констатировал учёный. А лечебное оборудование, выпускаемое отечественными предприятиями, страдает недоработками. Производимые ими магниты, ускорители, инжекторы выглядят привлекательно, но системы наведения, а также фильтрации пучка несовершенны, при облучении затрагиваются не только ткани опухоли. Эту проблему пока не удалось решить ни немецким, ни американским специалистам. Например, ионный ускоритель фирмы “Сименс” до сих пор работает лишь в экспериментальном режиме, поэтому подобное оборудование Германия закупает у японской фирмы “Тошиба”, где есть удачный опыт создания такого ускорителя.

По мнению Андрея Дмитриевича, в России обязательно нужно продолжать эти разработки, привлекая к ним наряду с ведущими учёными медицинских специалистов, двигаться к прорыву в ионно-протонной терапии, потому что большая доля пациентов нуждается в такой помощи. Велика потребность в суперпрецизионных пучках излучения в связи с тем, что не малому числу пациентов требуются несколько циклов облучения для подавления радиорезистентных опухолей. По признанию Каприн, “мы не научились воевать с саркомой. Вот если бы в нашем арсенале были установки для ионно-углеродного облучения, мы могли бы взять больных с саркомой на лечение”.

И ещё на одну проблему обратил внимание главный онколог Минздрава России. Центры лучевой терапии, построенные на больших расстояниях от онкологических клиник, не заполняются пациентами. Необходимо учесть и взять на вооружение опыт Японии: там такие небольшие центры создаются в составе специализированных онкоклиник, где есть квалифицированный медицинский персонал разного профиля, а не только специалисты в области лучевой терапии.

Директор Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН академик РАН **П.В. Логачёв**, продолжая обсуждение медицинских аспектов проблемы, проинформировал участников заседания о том, что в ИЯФе подошла к завершению многолетняя работа по созданию ускорительного источника нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии рака. Стартовал финансируемый Минобрнауки России проект по изготовлению установки для московского НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина, сдача её заказчику запланирована на первый квартал 2023 г.

Возвращаясь к ускорителям для нужд фундаментальной науки, Павел Владимирович отметил, что при реализации Федеральной программы синхротронных и нейтронных исследований важно обеспечить своевременный запуск установки СКИФ. Сегодня активно продолжается сооружение тяжелоионного коллайдера NICA в Дубне. Значение этой машины для долгосрочного развития ядерной физики самого высокого мирового уровня в нашей стране трудно переоценить. Однако есть ещё одно, не менее важное, направление современного научного поиска, которое может быть реализовано в России, обеспечив стране технологический, кадровый и репутационный научный задел на десятилетия вперёд. Это электрон-позитронный коллайдер сверхвысокой производительности, нацеленный на суперпрецизионные эксперименты по поиску явлений за рамками Стандартной модели в физике элементарных частиц. “Благодаря многолетней успешной работе большой научной команды Института ядерной физики им. И.Г. Будкера, мы находимся на пике мировой компетенции в этом направлении. Было бы неправильно на очень конкурентном международном поле упустить такую возможность для научного развития России”, – полагает академик Логачёв.

Выступивший за ним заместитель директора по научной работе Института теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова НИЦ “Курчатовский институт” доктор технических наук **Т.В. Кулевой** сделал акцент на линейных адронных ускорителях. Он образно сравнил их с “животворным началом, которое превращает в шедевр научной мысли не только оборудование, предназначенное для нужд физики высоких энергий или низкоэнергетической физики, но и нейтронные генераторы, установки для протонно-лучевой, ионно-лучевой терапии”. В этих проектах реализуются идеи начала XXI в., таким образом отечественная физика возвращает позиции, утраченные в последние десятилетия. Но это только начальный фундамент для движения вперёд. Сегодняшняя мировая тенденция – создание высокоинтенсивных установок, работающих в непрерывном режиме. В этой связи показателен проект DARIA, который разрабатывается коллек-

тивом, включающим в себя учёных и инженеров от Калининграда до Урала. Это проект компактного нейтронного генератора, пригодного для серийного производства и оснащения им научных и образовательных центров. На нём можно обучать будущих специалистов работе на нейтронных пучках. Такой генератор просто доставить в любую точку страны непосредственно к объекту исследования. Проект DARIA позволяет, используя инфраструктуру существующих институтов, создать задел для постройки затем более мощных комплексов нейтронных источников на реакции скалывания, таких как импульсный Европейский источник (European Spallation Source – ESS), возводимый в шведском городе Лунд.

Академик РАН **Е.Л. Чойнзонов**, поддержав академика А.Д. Каприна, высказал сожаление, что на протяжении последних 10–15 лет почти нет продвижения вперёд в создании и производстве современной отечественной аппаратуры для лечения онкопатологий. Авторы тех разработок, которые всё же появляются (например, малогабаритный бетатрон, созданный в Томском политехническом университете; этот аппарат пригоден для использования в онкодиспансерах), испытывают огромные трудности с их сертификацией. Без коллаборации научных институтов, промышленных предприятий, тесного взаимодействия с Минздравом России и Минобрнауки России эти вопросы не решить.

Научный руководитель Объединённого института ядерных исследований академик РАН **В.А. Матвеев** в своём кратком выступлении также подчеркнул, что действуя поодиночке, без консолидации усилий всех организаций, участвующих в реализации представленных на заседании президиума РАН проектов, обсуждаемые задачи решить будет очень трудно. ОИЯИ несёт важную миссию: созданный 65 лет назад и объединяющий учёных и специалистов 24 стран, он стремится обеспечить международное лидерство государств-членов ОИЯИ в исследовании фундаментальных свойств материи, прикладных исследованиях. Роль России как страны, где действует эта организация, очень ответственна: мы должны обеспечить широкий доступ научных групп из государств-членов, в первую очередь России, ко всем исследованиям, проводящимся в институте. ОИЯИ – комфортная площадка для сотрудничества в решении задач развития ускорительной техники, исследовательской инфраструктуры. Виктор Анатольевич призвал все заинтересованные организации обратить внимание на ведущиеся в институте работы по созданию новых технологий, использовать их при создании ускорителей и других установок.

Суммируя высказанные предложения, заместитель академика-секретаря Отделения физических наук РАН, руководитель секции ядерной

физики академик РАН **В.А. Рубаков** поблагодарил Б.Ю. Шаркова и его коллег за подготовку “дорожной карты”, в которой сформулированы первоочередные задачи в области ускорительной физики и ускорительной техники, намечены пути их решения. Он также отметил, что в нашей стране ускорительная физика и ускорительная техника традиционно были и остаются сильны. В этой области много как давно сложившихся, так и новых квалифицированных коллективов, они плотно взаимодействуют с ведущими международными научными организациями, много усилий вкладывают в реализацию международных проектов. Имеющийся потенциал важно наращивать, привлекать в область физики ускорителей талантливых молодых людей, уделяя внимание уровню их образования. С кадрами здесь в настоящее время немало трудностей: молодые специалисты по ускорителям в мире нарасхват, поэтому столь важно и в России обеспечить привлекательные для них условия работы.

Не перечисляя все проекты, предлагавшиеся выступавшими, в числе достойных реализации Валерий Анатольевич назвал проекты линейных адронных ускорителей, модернизации сильно-точного ускорителя в Троицке, DARIA, DERICA.

Особого внимания со стороны РАН, её Отделения медицинских наук требует ускорительная техника для медицины. К сожалению, внимание к этой области на государственном уровне недостаточно, финансирование разработок остаётся мизерным. По мнению Рубакова, Академия наук как координирующий орган должна обратиться к Правительству РФ с предложением дополнить уже принятые программы ещё одной позицией. Возможности для создания ускорительной медицинской техники достойного уровня в стране есть, хотя многие перспективные разработки находятся пока в зачаточном состоянии. Учёный выразил уверенность, что скоординированные усилия Академии наук, Минобрнауки, Объединённого института ядерных исследований, НИЦ “Курчатовский институт”, Росатома приведут к дальнейшему укреплению позиций Российской Федерации на ключевом направлении развития науки и технологий.

Завершая обсуждение, президент РАН А.М. Сергеев отметил, что в области создания современных ускорителей для решения научных задач Россия стремится не отстать от мировых лидеров, а по некоторым направлениям продолжает удерживать лидирующие позиции. Неблагополучная ситуация с выпуском ускорительной техники для медицины отражает общую ситуацию в российской экономике: за последние 20–30 лет упущено многое из того, что мы умели делать и что было востребовано и в нашей стране, и за рубежом. Но эту ситуацию необходимо менять.