

плотностью 10^{17} нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Пространственная локализация пучка создает уникальные возможности изучения изменения свойств материала в процессе облучения. Создание импульсных источников нейтронов открывает широкие перспективы исследований в области нейтронной ядерной физики низкой энергии, физики конденсированных сред, для получения прецизионных нейтронных данных, используемых в ядерной энергетике. Применение высокоинтенсивных мюонных пучков даст новый толчок развитию работ по химии и физике конденсированных сред, мюонному катализу термоядерной реакции. Перспективным является утилизация оставшегося после проведения экспериментов протонного пучка для производства

нейтронодефицитных медицинских нуклидов: ^{67}Ga , ^{82}Rb , ^{123}I , ^{127}Xe , ^{167}Tm и др. Высокая интенсивность пучка протонов позволит получать широкий ассортимент радионуклидов в количестве, необходимом для удовлетворения запросов крупных регионов.

Эффективное использование мезонной фабрики для проведения экспериментов в разнообразных областях современной науки и техники возможно только при активном участии научных центров СССР. На семинаре были рассмотрены вопросы организации широкого научного сотрудничества — институтов, заинтересованных в исследованиях на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР.]

ИЛЬИНОВ А. С.

4-я Международная конференция по сверхмощным электронным и ионным пучкам

Начатые в 60-х годах исследования сильноточных импульсных релятивистских электронных пучков (РЭП) продолжают с неослабевающей интенсивностью. Стимулирующим фактором являются многочисленные области приложений, в которых РЭП с присущей им высокой мощностью и энергией обеспечивают проведение уникальных экспериментов. В настоящее время во многих лабораториях мира используются сильноточные ускорители. Физические и технические проблемы этой области обычно рассматривались на многих конференциях с широким профилем. Однако существовала необходимость организации специальных встреч с детальным обсуждением вопросов сильноточных пучков. Первая такая конференция состоялась в 1975 г. в США. К ее официальному названию в дальнейшем было добавлено слово «ионные», что связано с интенсивным развитием физики и техники сильноточных пучков легких ионов, формируемых в диодах ускорителей РЭП.

4-я конференция состоялась в Палезо под Парижем с 29 июня по 3 июля 1981 г. На ней присутствовали более 200 специалистов из ведущих лабораторий СССР, США, Франции, Японии и других стран. Тематика конференции была традиционной: применение ионных и электронных пучков для нагрева термоядерных мишеней и плазмы в ловушках, физика электронных и ионных диодов, транспортировка энергии пучков, коллективное ускорение, СВЧ-генерация, лазеры на свободных электронах, применение пучков для возбуждения лазеров, техника ускорителей. На этой конференции так же, как и на предыдущей, обсуждалось применение пучков тяжелых ионов для нагрева мишеней. Впервые обстоятельно излагались результаты опытов по схлопыванию плазменных оболочек, разгоняемых давлением магнитного поля тока сильноточных ускорителей.

Наибольшее внимание было уделено сильноточным пучкам легких ионов. Это направление возникло в США и развивается во многих крупных лабораториях этой страны, СССР, Франции, Японии, ФРГ. Основной его целью является поджиг термоядерной мишени. Потенциальными преимуществами ионов по сравнению с электронами является отсутствие тормозного излучения, нагревающего мишень, а также ожидаемый классический механизм энерговклада в оболочку и лучшая фокусировка ионов, обеспечивающая концентрацию пучка на мишень. Специфической чертой современного этапа исследований США по инерционному удержанию на основе пучков является ориентация на демонстрацию возможности поджига мишени в однократных режимах. Реакторные проблемы, обусловленные режимом повторяющихся микровзрывов, отошли пока на второй план. В результате оказалось допустимым применять системы формирования пучков

и концентрации их энергии, рассчитанные на однократное использование. Программа сильноточных пучков легких ионов включает получение ускоренных ионов, изучение механизма, вызывающего угловой разброс, фокусировки и транспортировки ионов на поверхность мишени, исследование механизма взаимодействия с веществом при больших потоках мощности. Как и прежде, основные результаты были представлены в докладах США. По сообщению К. Кусва (Сандиевская лаборатория), для поджига мишени необходима энергия, запасенная в пучке $1-2$ МДж при фокусировке до плотности потока ~ 40 ТВт/ см^2 и длительности импульса $10-30$ нс. Достичь такую плотность предполагается или с помощью баллистической транспортировки сходящихся нейтрализованных по заряду и току пучков, или с помощью плазменных каналов с внешним азимутальным магнитным полем. В Сандиевской лаборатории отдается предпочтение первому методу концентрации ионов на мишень. При предполагаемом радиусе диода 40 см и размере мишени 1 см угловой разброс ионов на выходе диода не должен превосходить 1° .

Для формирования ионных пучков используются главным образом диоды с магнитной самоизоляции и отражением электронов (пинч-рефлексные диоды ПРД), а также с изоляцией внешними полями. Рекордный ток пучка протонов, по сообщению Дж. Куперштейна, достигнут на установке «Питон» в пинч-рефлексном диоде (Международная физическая компания МФК): $I = 1$ МА, $W = 130$ кДж. Максимальная плотность ионного тока на выходе из ПРД на установке «Геймбл-2» (Лаборатория ВМФ, США) составляла 30 кА/ см^2 , что соответствует плотности потока $3 \cdot 10^{-3}$ ТВт/ см^2 . Типичная угловая расходимость пучков в таких диодах составляет $6-10^\circ$, что превосходит ожидаемую из расчетов траекторий ионов, и требуются дополнительные эксперименты для объяснения этих результатов. Примерно такие же результаты по угловой расходимости и эффективности получены в Сандиевской лаборатории на установке «Прото-1» в диоде с изоляцией внешним магнитным полем. Профилирование анода обеспечило плотность потока протонов ~ 1 ТВт/ см^2 , при этом энерговклад в мишень не противоречил классическому механизму торможения ионов. В дальнейшем в этой лаборатории предполагают использовать для опытов на установке РВГА-1 диод нового типа, получивший название амфион. В нем магнитное поле, подавляющее ток электронов, создается током диода, а ионы вытягиваются из плазмы, предварительно инжектируемой в диод. Импеданс диода растет во времени импульса. Такой рост автоматически создает условия для последующей группировки ионного пучка из-за увеличения напряжения на диоде.

Интересная возможность газодинамического ускорения ионов облаком осциллирующих электронов обсуждалась в докладе Д. Д. Рютова (ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск). Экспериментально подтверждена высокая эффективность преобразования энергии электронов в ионный пучок (~50%), а также предложен способ фокусировки ионов при их перезарядке в нарастающем магнитном поле.

Схема транспортировки пучков по плазменным каналам, проанализированная главным образом в работах специалистов Лаборатории ВМФ, Сандиевской лаборатории и ИАЭ им. И. В. Курчатова, существенно усложнилась. Оптимизация по потерям энергии на расширение канала и столкновения приводит к большому диаметру канала ~5 см и ограничению мощности через канал до 2—4 ТВт. Пучок на выходе из канала предполагается фокусировать до диаметра 1 см дополнительным током (Лаборатория ВМФ). Экспериментально установлено, что эффективность транспортировки в стабилизированных каналах длиной до 2,5 м составляет около 100%. В докладе Л. И. Рудакова были проанализированы неустойчивости ионных пучков в плазменных каналах в условиях демонстрационного эксперимента. В сообщениях специалистов лабораторий Франции и Японии были приведены первые результаты работ по формированию и фокусировке сильноточных ионных пучков. По-видимому, потребуется не менее 2—3 лет исследований для установления возможности поджига мишени, облучаемой пучками легких ионов.

В ИАЭ им. И. В. Курчатова и Научно-исследовательском центре Вальдюк (Франция) продолжается изучение нагрева мишеней сильноточными электронными пучками. В отличие от ионных уже сегодня возможно полномасштабное моделирование энерговыклада электронных пучков в мишень. Во французских докладах подтверждается аномальный энерговыклад замагниченных электронов пучка в оболочку, обнаруженный в экспериментах на установке «Тритон» (СССР). Температура фольги ограничена степенью фокусировки и достигала ~25 эВ. В докладе В. П. Смирнова и др. приведены результаты модельных экспериментов по концентрации энергии РЭП на мишень с помощью сходящихся вакуумных линий и по фокусировке в диоде с малым аспектным отношением.

Впервые подробно обсуждались эксперименты по сжатию проволочных и газовых оболочек магнитным полем тока сильноточных ускорителей. Пока эти исследования направлены на получение источника низкоэнергетического рентгеновского излучения, но в будущем, как уже отмечалось в отечественной литературе, разогнанный лайнер можно использовать для поджига мишени. В США выполнены эксперименты на установках «Питон» ($P = 3$ ТВт, $I_{\text{макс}} = 3,5$ МА) и «Блек-Джек-5» (10 ТВт, 5 МА). В результате сжатия получена плазма плотностью до 10^{21} см⁻³ и температурой более 1—2 кэВ. В МФК рассматривается возможность возбуждения рентгеновского лазера при сжатии смеси криптона и аргона на линии энергией 83 эВ. При малой ускоряемой массе динамика сжатия удовлетворительно описывается одномерным приближением, хотя диагностические методики показывают перетяжки и в некоторых случаях змейки в конечной стадии схлопывания оболочек. Для развития этих экспериментов в США создаются более мощные установки. В нашей стране также начаты опыты по магнитному сжатию оболочек и плазмы наносекундными импульсами тока. Доклад о сжатии лазерной плазмы в диоде сильноточного ускорителя был представлен А. А. Коломенским (ФИАН). В области коллективного ускорения наиболее существенные результаты были получены в ОИЯИ. В. П. Саранцев сообщил последние результаты по ускорению ионов в электронных кольцах, А. А. Коломенский — возможности ускорения ионов при транспортировке РЭП в диэлектрических каналах.

Не сокращается активность исследований нагрева и поддержания равновесия плазмы в магнитных ловушках с помощью сильноточных пучков. В Корнеллском университете (США) продолжаются работы по созданию

сильноточных ионных колец для обращения поля (ловушка типа «Астрон») и формирования компактных торов. В группе докладов обсуждалась возможность бестрансформаторного поддержания тока в тороидальных ловушках при инжекции сильноточных пучков электронов или ионов. Несколько сообщений касалось нагрева электронными пучками плазмы в незамкнутых ловушках. Наибольшие успехи получены в ИЯФ СО АН СССР, где получена эффективная передача энергии РЭП плазме концентрацией до $2 \cdot 10^{14}$ см⁻³ (=30%), что позволяет предложить проект многопучковой ловушки длиной до 20 м и напряженностью магнитного поля до 100 кГс, нагреваемой электронным пучком энергией 1 МДж.

Возросло число работ по пучкам тяжелых ионов. Среди них информация о первых результатах по созданию демонстрационной установки в Аргоннской лаборатории США, состоящей из высокочастотного линейного ускорителя для Xe^{+8} на 40 МА и накопительного кольца. В докладах специалистов США, ФРГ и Франции обсуждались характеристики мишеней, предназначенных для нагрева тяжелыми ионами. Так, по сообщению Д. Кифа из Беркли, для получения вспышки с коэффициентом усиления 100 необходимо иметь в пучке энергию 3 МДж при мощности 150 ТВт. В этой лаборатории предполагается использовать линейные индукционные ускорители (ЛИУ) с последующими устройствами преобразования пучка, позволяющие облучать мишень более чем 30 пучками.

Как обычно, значительное внимание было уделено СВЧ-генераторам и лазерам на свободных электронах, где основная часть докладов представлена специалистами СССР, США и Франции.

Обсуждение техники ускорителей, физики диодов и вакуумных линий с магнитной самоизоляции традиционно заняло значительную часть рабочего времени конференции. Отличительной особенностью его являлось повышенное внимание к проектам и работе больших установок. Впервые сообщались параметры и устройство ускорителей «Питон» (МФК) и «Блек-Джек-5» (фирма «Максвелл»). В докладах МФК приведены сведения об установке «Игл» ($P = 2$ ТВт, $V = 2$ МВ, $I = 1$ МА, $\tau_{1/2} = 95$ нс), которая является модулем планируемой установки «Рулет» мощностью 40—50 ТВт. Наиболее значительная 36-модульная установка РВФА-1 (Сандиевская лаборатория) развивает до 30 ТВт в 40-нс импульсе. На ней проведены успешные испытания энергетических импульсных систем и опробованы возможности подсоединения 36 вакуумных линий на один ионный диод. В ближайшее время будут последовательно соединены две части установки, отличающиеся знаком выходных импульсов, на общий кольцевой диод, что позволит иметь ускоряющий потенциал 4 МВ. Начаты работы по конструированию установки РВФА-2 на $W = 3,5$ МДж, $\tau = 30$ нс, $V = 2$ МВ. В результате параллельно-последовательного соединения модулей можно будет получать ускоряющее напряжение 8 МВ. В отличие от прежних планов установка разместится в отдельном здании. Ее сооружение предполагается завершить в 1985 г.

Среди построенных установок следует выделить сильноточный ЛИУ на основе водных двойных формирующих линий, построенный в Ливермор и получивший название ЕТА. Его параметры: $I = 10$ кА, $\tau = 40$ нс, $E = 4,5$ МэВ, частота повторения импульсов 2 Гц. Там же создается ЛИУ, рассчитанный на получение РЭП параметрами $E = 20$ МэВ, $I = 4$ кА, $\tau = 60$ нс, генерирующий серию последовательных импульсов. На конференции отмечался также интерес к сильноточным бетатронам (Лаборатория ВМФ, фирма «Максвелл» и Калифорнийский университет). Несмотря на существенное развитие техники и физики сильноточных пучков, эта область пока не нашла четко определенного промышленного применения. Видимо, поэтому появление представленного В. И. Перевицким и Л. П. Кубаревым доклада о возможности создания линий передачи на основе стабилизированного электронного пучка привлекло большое внимание.

Конференция прошла успешно, чему способствовала четкая организационная деятельность ее устроителей. В более чем 140 докладах содержится много новой информации, свидетельствующей о последовательном развитии исследований. Вместе с тем следует отметить отсутствие принципиально новых идей как в области физики и физических приложений, так и создания сверхточных ускорителей и импульсной энергетики. Глубина теоретических, экспериментальных и технических проработок все еще недостаточна. В особенности это относится к ионным и электронным пучкам, где понимание пока отстает от

технических возможностей. Более подробное и широкое обсуждение сжатия оболочек током ускорителей говорит о принципиально новом использовании их мощной энергии, что создает предпосылки для расширения тематики конференции. Явления в плазменных нагрузках диодов сверхточных ускорителей имеют много общего с плазменным фокусом и классическими пинчами. Следующая конференция состоится в Сан-Франциско (США) в 1983 г.

СМИРНОВ В. П.

XXX Сессия Научного Комитета ООН по действию атомной радиации

Сессия состоялась в июле 1981 г. в Вене (Австрия). В ее работе участвовали представители стран, состоящих в Комитете, эксперты, входящие в состав национальных делегаций, представители международных организаций: МАГАТЭ, ВОЗ, МКРЗ, МКРЕ.

На сессии рассматривалось несколько глав, которые должны войти в научный доклад, подготавливаемый Комитетом для Генеральной Ассамблеи ООН в 1982 г.

На первом заседании У. Синклер сделал доклад, в котором сообщил, что согласно последним исследованиям, проведенным в США, доза от нейтронов, полученная жителями Хиросимы и Нагасаки, должна быть пересмотрена. Оценки дозы облучения лиц, выживших после атомной бомбардировки, были основаны на расчетах кермы в воздухе, выполненных в Ок-Риджской национальной лаборатории в 1965 г. По этим оценкам, вклад нейтронного компонента в дозу облучения жителей Нагасаки был незначительным, однако в Хиросиме на сравнительно большом расстоянии от эпицентра до 20% кермы в воздухе было обусловлено нейтронами деления. Новые расчеты, выполненные в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса (США), показали, что с учетом уточненных и более полных данных о мощности взорванных устройств, их конструктивных особенностей, метеорологических условий (в частности влажности) во время взрыва и пр., нейтронный компонент дозы должен быть снижен примерно на порядок (~9 раз), а керма за счет γ -излучения увеличена в 4 раза. Для окончательных оценок потребуются дополнительные исследования, которые предполагается завершить в 1981 г.

По имеющимся данным, оценки риска смертности от облучения жителей Хиросимы могут измениться не более чем в 2 раза. Новое значение кермы не окажет существенного влияния на оценки риска облучения, приведенные в докладе Комитета за 1977 г. Отмечалось, что информация о дозе облучения лиц, выживших после атомных взрывов в Хиросиме и Нагасаки, является лишь одним из источников данных об облучении населения, которые Комитет использовал в своих оценках.

На заседании рабочей группы Комитета было решено не включать в доклад Генеральной Ассамблеи 1982 г. документ о зависимости доза — эффект для индуцированного ионизирующим излучением рака, так как пересмотр дозиметрических оценок для лиц, о которых говорилось, может повлиять на оценку риска заболевания лейкемией, раком грудной железы и другими видами рака. Комитет решил продолжить сбор материала по этой главе, чтобы опубликовать ее отдельно после 1982 г., как только имеющиеся в его распоряжении данные будут сочтены достаточными.

Как обычно, документы, подготовленные Секретариатом, рассматривались на заседаниях двух рабочих подгрупп.

Физическая подгруппа. Здесь обсуждались следующие документы.

Документ «Модели оценки дозы». Этот документ существенно переработан. Введен специальный раздел о различных физических, биологических, экологических величинах, единицах и некоторых терминах. Введена единая система символов и обозначений. Все числовые значения активности и дозы приводятся в единицах системы СИ. Последовательно рассмотрены дозиметрические и экологические модели, использовавшиеся при оценке радиационного воздействия на человека и окружающую среду.

Документ «Радон, торон и их дочерние продукты». Он получился всеобъемлющим, удачно скомпонованным, в нем освещены вопросы, связанные с образованием этих радионуклидов, их поведением во внешней среде, поступлением в организм человека, дозиметрией и т. д. Отмечается существенное по сравнению с прежними оценками (от 50 до 100%) увеличение дозы за счет ингаляционного поступления, что объясняется использованием новых числовых значений взвешивающих факторов и дозовых коэффициентов. Материалы вызвали большую дискуссию, и В. Якоби (ФРГ) обещал представить к сентябрю 1981 г. новые данные по этому вопросу.

Документ «Облучение в результате производства ядерной энергии». Произошла переоценка вклада в ожидаемую коллективную дозу различных этапов топливного ядерного цикла. По новым оценкам, наибольший вклад в нее вносят добыча урана и особенно его переработка, которым сопутствует эманация радона и его дочерних продуктов. Как следует из таблицы, вклад в нормализованную ожидаемую эквивалентную эффективную дозу облучения населения Земного шара определяется только радоном, точнее, его дочерними продуктами и частично углеродом. Вклад в дозу за счет выбросов ядерных реакторов и заводов по переработке облученного ядерного топлива во много раз меньше. Учитывая важность этих оценок, Комитет поручил тщательно проанализировать исходные данные, положенные в основу дозиметрических расчетов, дополнительно определить дозу для случаев эманации радона из открытых хвостохранилищ и хранилищ, покрытых слоем грунта, синтетическими или другими материалами для снижения поступления радона в воздух, учесть возможность эрозии, вертикальную миграцию радионуклидов в течение длительного периода времени и т. п. Необходимо привести также данные о фоновой дозе за счет природных источников радона. Дискуссию вызвало обсуждение приложений к этому