

ников на токи 300 $\mu\text{ка}$, 2 ма , 10 ма . Разработана серия источников типа «дуоплазматрон» на токи 20 ма в постоянном режиме и на токи 0,05, 0,5 и 1,5 а в импульсном режиме. Приведены данные источника с разрядом типа Пеннинга, работающего в импульсном режиме с током 15 ма . Сообщалось также о разработанных источниках электронов с токами в постоянном режиме в 1 и 10 ма .

В докладе Н. Ф. Иванова, В. С. Кузнецова, А. И. Солнышкова (НИИЭФА) «Формирование импульсных ионных пучков с током порядка сотен миллиампер в ускорителях прямого действия» представлена методика расчета оптической системы сильноточных пучков с учетом объема заряда. Указанный метод использован для расчета оптики инжектора ионов водорода на 400 ма при энергии 700 кэв . Приведены результаты измерений, согласующиеся с расчетными. Получен пучок диаметром 15 мм с током 400 ма при энергии пучка 700 кэв .

А. Н. Сербинов и В. И. Мороко (ФЭИ) сообщили о разработанном ими импульсном высокочастотном ионном источнике с сотовой системой вытягивания. Было испытано два варианта системы вытягивания, отличающихся величиной зазора между катодом и анодом (1,8—2,2 мм). Для первого варианта при ускорении до энергии 270 кэв получен ионный ток 21 ма в импульсе длительностью 1 $\mu\text{сек}$. Другой вариант дал ток 220 ма . Расход газа источника на водороде составил 15 $\text{см}^3/\text{ч}$.

В докладе П. С. Маркина (АН УССР) приведены данные экономичного источника ионов. Ионный источник основан на дуговом разряде в аксиальном магнитном поле с накаленным катодом, полым анодом и изолированным антикатодом (по типу источника Абеля, Мекбаха). Источник исследован в постоянном и импульсном режимах работы. В спектре ионного тока имеются двухзарядные ионы углерода, азота и кислорода.

В докладе В. И. Манько и др. (ИАЭ) рассмотрен вопрос параллельного питания ионных источников электростатического генератора с двумя ускорительными трубками.

Б. П. Адысевич (ИАЭ) сообщил об устройстве и результатах испытаний источника поляризованных ионов (протонов и дейтонов), в котором поляризация ядер в атомном пучке достигалась адиабатическим выводом атомов водорода, находящегося в состоянии с $m_J = +1/2$ из области сильного в область слабого магнитного поля и последующей ионизацией электронным ударом. Разработанный авторами источник поляризованных

ионов обеспечивает ток $\sim 0,1 \mu\text{ка}$. Поляризация протонов достигает 50%, поляризация дейтонов — 33%.

Построению источника на этом же принципе был посвящен доклад Р. П. Слабоспицкого и др. (Физико-технический институт АН СССР — ФТИ).

В докладе А. Я. Таранова, Ю. З. Левченко (ФТИ) «Система инжекции отрицательных ионов перезарядного электростатического ускорителя ПГ-5» была рассмотрена конструкция источника отрицательных ионов перезарядного электростатического ускорителя, который основан на преобразовании положительных ионов в отрицательные через пароструйную ртутную мишень.

Авторами получены интенсивные пучки отрицательных ионов водорода и кислорода. Изучены условия инжекции пучка отрицательных ионов в перезарядный ускоритель, условия проходимости пучка по ионпроводу ускорителя при различных напряжениях на кондукторе и т. д.

Вопросу построения серийных нейтронных генераторов НГ-200-III с потоком нейтронов свыше 10^{10} нейтр/сек посвящен доклад В. Д. Михайлова (НИИЭФА).

В сообщении О. Б. Овчинникова (НИИЭФА) говорилось о конструкции ускорителя на 2,5 Мэв с симметричной схемой умножения в качестве источника высокого напряжения. Ускоритель рассчитан на получение пучка ионов или электронов мощностью 25 квт . Высоковольтная часть ускорителя помещена в котел со сжатым газом.

Б. И. Альбертинский выступил с сообщением о разработке группой сотрудников НИИЭФА инженерной методики расчетов выходных характеристик конденсаторных схем умножения напряжения. Проведенное докладчиком сравнение расчетов и результатов измерений на различных моделях симметричных каскадных генераторов показало, что предлагаемая методика вполне удовлетворительно учитывает влияние внутреннего сопротивления вентиля (в том числе и полупроводниковых), внутреннего сопротивления источника питания, распределенных по каскадам защитных сопротивлений, паразитных емкостей конструкции и распределенных по каскадам компенсирующих индуктивностей. Были приведены выражения для расчета коэффициентов моделирования различных схем напряжения.

По окончании совещания делегаты посетили Лабораторию ядерных проблем, Лабораторию ядерных реакций и Лабораторию нейтронной физики.

Г. М. Осетинский

Международная конференция по секторным циклотронам и мезонным установкам

В течение последних нескольких лет циклотроны с секторной фокусировкой (ЦСФ) вызывают все больший интерес во многих лабораториях мира. В некоторых лабораториях ЦСФ уже работают или находятся в процессе строительства, многие другие лаборатории планируют их сооружение. Поэтому ученые университетов и лабораторий (особенно европейских), занимающиеся ЦСФ, проявляют большой интерес к любой возможности обмена идеями и опытом. В состоявшейся в ЦЕРНе в апреле 1963 г. конференции приняло участие 150 ученых из 60 лабораторий Европы (в том числе

СССР) и Америки; было заслушано 66 докладов. Поскольку предыдущая конференция в Лос-Анжелосе проходила сравнительно недавно, эта конференция была посвящена либо новым разработкам, либо темам, не обсуждавшимся на предыдущих конференциях (физические эксперименты, которые могут быть выполнены при помощи этих ускорителей, ускорение поляризованных частиц и т. д.).

Опыт эксплуатации циклотронов. Р. Ливингстон (Ок-Ридж), открывая заседание, сделал обзор уже работающих машин, приведенных в таблице. Он отме-

Изохронные циклотроны, находящиеся в эксплуатации (на 15 апреля 1963 г.)

Местонахождение ускорителя	Год начала работы	Число секторов	Диаметр полюса, см	Максимальная энергия внутреннего пучка, Мэв	Энергия других пучков, Мэв	Энергия выведенного пучка, Мэв	Число орбит
Делфт	1958	4	85	12 (p)			>300
Урбана	1958	4	111	15 (p)			>100
Дубна	1959	6	120	13 (d)	4—15 (p)	15 (p)	>1000
Харуэлл	1959	3	56	3 (p)			
Москва	1959	3	150	32 (d)	6 (p), 17, 29 (H ²), 35 (He ³)	32 (d), 20 (H ²)	>160
Лос-Анжелос	1960	4	125	50 (p)	48 (H ⁻)	48 (H ⁻)	>1000
Бирмингем	1961	3	102	12 (d)	11 (D ⁻)		>400
Беркли	1961	3	224	130 (α)	25, 50 (p), 16, 33, 40, 65 (d), 25 (He ³), 33, 65, 75, 80 (α)	50 (p), 16—38 (d), 33—75 (α)	>600
Ок-Ридж	1962	3	193	90 (α)	8, 12, 32 (p), 40 (d)		>500
Боулдер	1962	4	132	24 (p)	80 (α)		>200
Дейвис	1962	3	56	10 (p)	16, 19 (p), 8 (H ⁻), 17 (D ⁻), 30 (α)	8 (H ⁻), 16, 19 (p)	>100
Карлсруэ	1962	3	229	50 (d)			>210
Анн-Арбор	1962	3	211	40 (d)	50 (H ²)		>150
Эйндховен	1963	3	142	12 (p)	7, 12 (p), 15 (d)	12 (p), 26 (d)	>400
Ок-Ридж (электронная машина)	1961	8	79	530 кэв		430 кэв	>2600

тил, что трудностей при достижении изохронизма не было, качество выведенного пучка такое же, как на других ускорителях, скважность равна 4—5, успешно осуществлено ускорение отрицательных ионов, открывающее новые возможности для физического эксперимента. Серьезной трудностью является введенная радиоактивность, однако на низких энергиях применение графита значительно облегчает проблему.

Положительным качеством ЦСФ является их гибкость и надежность: небольшие перестройки по энергии могут быть осуществлены за несколько секунд, существенное изменение энергии или изменение типа ускоряемых частиц могут быть сделаны за несколько часов, на номинальных режимах машины работают стабильно в течение многих часов и дней.

Затем было доложено о машинах в Ок-Ридже, Беркли и др. Большой интерес вызвало описание экспериментальной процедуры настройки оптимальных параметров ВЧ-напряжения и магнитного поля для получения наилучшего изохронизма.

В циклотроне, сооруженном в Карлсруэ, орбиты могут быть прослежены вплоть до максимальной энергии (200 оборотов). Было установлено, что возмущение поля с основной гармоникой порядка 0,1 % приводит к бетатронным колебаниям с амплитудой 9 мм.

Было доложено о том, что пущенном циклотроне в Анн-Арборе. Наиболее современным ускорителем является циклотрон фирмы «Филипс» (диаметр 130 см). Окончательная сборка машины была закончена 4 апреля 1963 г., двумя днями позже было получено 400 оборотов до радиуса 53 см (14 Мэв). После некоторой настройки 12 апреля были получены частицы с энергией 20 Мэв. 17 апреля был установлен дефлектор, а 18 апреля было выведено 30% частиц.

Вывод частиц является одной из проблем, где современные достижения наиболее поразительны. Оба применяемых метода—обычный регенераторный и резонансный, использующий как естественный, так и возбужденный резонанс—дают замечательные результаты. В электронной модели (Ок-Ридж) при использовании резонанса $\nu_r = 2$ выведено 85% частиц. На циклотроне в Беркли, где используется только электростатический канал, выведено 40% частиц. Надежность этого типа экстрактора определяется не только точным расчетом канала, но и тщательным исследованием проблем, связанных с высоким напряжением.

На циклотроне в Бирмингеме при помощи электростатической регенеративной системы был получен выведенный ток до 40 мка при эффективности 35—40%.

Фирма «Филипс» разработала новое устройство, названное регенератором-компрессором; компрессор сдвигает возмущение, вызванное действием регенератора на большие радиусы, обеспечивая радиальный фокус на входе в канал и поддерживая большое разделение орбит. Применение этого устройства позволило вывести из фазотрона 15% частиц.

Физические эксперименты на ЦСФ и мезонных установках*. Открывая заседание, А. Цукер (Ок-Ридж) проанализировал физические проблемы, которые могут изучаться на ускорителях с высокой интенсивностью в диапазоне 20—100 Мэв. Он подчеркнул, что особенно полезным свойством ЦСФ является возможность изменения энергии и рода частиц в сочетании с высоким ка-

* Под мезонными установками подразумеваются ускорители на энергии 400—800 Мэв с интенсивностью в 100 раз большей, чем у современных фазотронов.

чеством пучка и хорошим разрешением по энергии (порядка 10 кэв).

Г. Бернардини (Рим и ЦЕРН) отметил интерес π -мезонной физики к ускорителям на ~ 500 Мэв. Для проведения некоторых точных экспериментов и изучения редких событий необходимы пучки протонов с высокой интенсивностью и энергией $800-1000$ Мэв. Еще более высокие энергии были бы интересны для исследования высших резонансов и даже для вскрытия K -мезонной оболочки, однако между 1 и 12 Гэв не видно какой-либо наиболее предпочтительной энергии.

После этих вступительных лекций было обсуждено несколько специальных вопросов:

— ускорение отрицательных ионов водорода, которое кажется возможным и обещает весьма заманчивое решение проблемы вывода;

— получение и ускорение поляризованных частиц, при помощи которых может быть поставлено много новых экспериментов.

В настоящее время получены удовлетворительные результаты и кажется вполне возможным при надлежащем выборе магнитного поля и ускоряющей системы повысить энергию отрицательных и поляризованных частиц, ускоряемых в ЦСФ, до 100 Мэв.

Вопросы защиты и активации, связанные с конструкцией мишеней и поглотителей пучка, весьма серьезны для ускорителей с высокой интенсивностью. Для мезонных установок эти вопросы являются наиболее суровыми ограничениями. Было исследовано много различных материалов, однако, кроме углерода и кремния, никакие другие вещества не дают заметного уменьшения активации. Возможно решение будет найдено в выборе соответствующей геометрии деталей, в которые ударяет пучок, и в использовании тяжелых материалов для защиты от наведенной активности.

Один из докладов был посвящен проблеме скважности, особенно в применении к мезонным установкам. В соответствии с целью эксперимента, скоростью счета и временем, необходимым для проведения эксперимента, можно оценить нужную низкочастотную и высокочастотную скважность.

Новые разработки в теории и конструкции ЦСФ. На конференции было доложено много новых интересных разработок. Среди них можно отметить количественное изучение влияния угла спирали на область устойчивости; программу, обеспечивающую получение карт магнитного поля для ускорителя с энергией до $800-900$ Мэв с заданным законом изменения v_z от энергии; новый метод расчета распределения магнитного поля, учитывающий переменную проницаемость.

От Мичиганского университета была представлена работа, в которой показано, что использование узкой щели в центре при предварительном ускорении уменьшает бетатронные колебания и снижает скважность. Исследована возможность использования двухдуантной ускоряющей системы, работающей на разных гармониках. Были сделаны более детальные расчеты для различных схем вывода. Доложено о положении со строительством некоторых ЦСФ (в Милане, Орсе, Гренобле, Мичиганском университете). Предложен оригинальный метод исследования магнитного поля циклотрона — прямого определения v_z — при помощи плавающей проволочки («CSF»). Заслуживает упоминания конструкция магнитного канала и дефлектора в виде коаксиальной линии с прорезью, где сравнительно просто может быть получена очень хорошая форма поля.

Группа из Беркли исследовала проблемы, связанные с использованием очень высоких напряжений в дефлекторах: усиление механической жесткости электродов (для предотвращения вибраций при воздействии электрических сил), выбор материала (инконель или нержавеющей сталь и вольфрам для анода) и влияние пучка. При хорошей конструкции с учетом коэффициента запаса применим закон $VE = 1500$ кв²/мм.

Было доложено о магнитном датчике положения пучка, разработанном в Аргонне; датчик, не внося искажений, позволяет измерить положение пучка в $0,09$ мка с точностью до $\pm 0,1$ мм.

Мезонные установки. Р. Ричардсон (Калифорнийский университет) сделал обзор различных типов мезонных установок. Сравнение основывалось на таких параметрах, как скважность, достижимость пучка, качество пучка в отношении точности знания энергии, возможность изменения энергии, возможность одновременного получения различных пучков, наведенная радиоактивность, сложность конструкции, надежность и стоимость. Было показано, что обычный секторный циклотрон имеет приемлемые параметры. Циклотрон для ускорения отрицательных ионов, даже если его размеры увеличиваются вдвое, все же не будет слишком дорогим, но будет иметь такие преимущества, как изменяемая энергия, хорошая скважность (если потеря изохронизма наступает непосредственно перед обдиранием) и возможность одновременного получения нескольких пучков с различными энергиями. Фазотрон со спирально-гребневой фокусировкой может дать существенно большую интенсивность, чем обычный фазотрон, из-за более высокой частоты повторения; эффективность вывода частиц повышается, кроме того, он способен ускорять разные частицы. Несколько отличных по конструкции от предыдущего ускорителя спирально-секторный кольцевой фазотрон имеет сходные параметры: интенсивность до 100 мка, эффективность вывода $\sim 30-40\%$.

Синхрофазотрон с сильной фокусировкой значительно дешевле, однако получить на нем высокую интенсивность невозможно. Циклотрон с разделенными орбитами может обладать большим количеством отмеченных достоинств, но стоимость и сложность подобной машины кажутся весьма высокими.

В линейных ускорителях эффективность вывода равна 100% , интенсивность и энергию пучка регулировать очень легко, также легко осуществить ускорение поляризованных частиц. Недостатками являются большая скважность и, возможно, стоимость. Лучшую скважность может иметь криогенный линейный ускоритель. Исследования образцов показали, что при использовании свинца и ниобия ВЧ-потери уменьшаются в 10^4 раз. Однако изготовление полномасштабных резонаторов представляет собой очень трудную технологическую задачу, и, вероятно, пройдет несколько лет, прежде чем можно будет сделать инженерный проект такого ускорителя.

Группа из Дюриха предложила кольцевой изохронный циклотрон, в котором центральный район отсутствует. Частицы инжектируются в кольцо при энергии 70 Мэв от обычного ЦСФ, и конечная энергия, равная 500 Мэв, ограничивается резонансом $v_r = 1,5$. Преимущество кольцевой машины по сравнению с обычной заключается в возможности использовать несколько схем вывода и облегчении введения мишеней. При переводе частиц от циклотрона инжекции к кольцевому можно избежать пересечения резонансных линий и получить в кольце лучшую фокусировку, выбрав v_z .

близкое к единице. Конечно, эффективность вывода и ввода будет меньше 100%.

Циклотрон с разделенными орбитами, предложенный Ф. Расселом (Ок-Ридж), представляет собой острое соединение линейного и циклического ускорителей. Он является циклической машиной, но каждый оборот (всего около 100 оборотов) имеет свое независимое управляющее поле, что позволяет, как и в линейном ускорителе, избегать резонансных эффектов. Ускорение осуществляется в 5000—10 000 ускоряющих промежутках, образуемых 50—100 резонаторами, расположенными в меридианальных плоскостях. Фазовая устойчивость такая же, как в линейном ускорителе, но группировка ускоряющих зазоров в резонаторах обеспечивает менее жесткие допуски на ВЧ-поле. Изменение энергии в данной точке невозможно, но теоретически вывод может быть осуществлен из любой точки орбиты с эффективностью 100%. Наибольшим недостатком этого ускорителя, очень похожего на осинный улей, является чрезвычайная сложность и огромное количество инженерных проблем, связанных с созданием магнитов, вакуумной системы и резонаторов.

Были обсуждены основные ограничения, накладываемые на интенсивность в секторно-фокусирующих циклотронах с частотной модуляцией, и показано, что можно получить значительно большую интенсивность, чем в существующих фазотронах.

Наконец, был описан проект микротрона для μ -мезонов, который позволит получить чистые пучки μ -мезонов с высокой интенсивностью.

Конференция ясно показала, что время, когда ускорители строились на основании грубых расчетов или приближенных соотношений, миновало. В настоящее время вычислительная техника позволяет до начала

строительства детально изучить не только линейные, но и нелинейные задачи.

Опыт, полученный на уже работающих машинах, показывает, что вся прделанная теоретическая работа оказалась исключительно полезной. Машины работают в соответствии с расчетами и запускаются легко, благодаря точности расчетов их работа весьма надежна, гибка и многообразна. Эти достижения являются стимулом для строителей машин, а развитие теории ведет и к лучшему пониманию обычных циклотронов, фазотронов и задач вывода из всех циклических ускорителей.

Секторные циклотроны ставят перед инженерами много трудных и интересных задач в связи с магнитным полем, ВЧ-системой и техникой высоких напряжений. Возможно, что эти машины вызывают несколько меньший интерес, чем ускорители на очень высокие энергии, но они значительно более доступны; и весьма знаменательно, что, хотя циклотронная техника имеет длинную историю, все еще появляются и внедряются новые изобретения. Можно даже предположить, что недостаток энтузиазма к ускорению H^+ ионов частично объясняется тем, что эта задача слишком проста и не сулит достаточного поля деятельности для теоретиков и инженеров.

Независимо от того, какой тип ускорителей будет принят для строительства мезонных установок, они весьма нужны для детального изучения π - и μ -мезонов. Можно надеяться, что будут строиться циклотроны на энергии 500—800 Мэв, дающие очень хорошие пучки. Интервал энергии до 12 Гэв, необходимый для изучения K -мезонов и антипротонов, очевидно должен обслуживаться машинами других типов.

П. Лапостол (ЦЕРН, Женева)

Симпозиум по термодинамике ядерных материалов

В мае 1962 г. в Вене состоялся созданный МАГАТЭ Международный симпозиум по термодинамике ядерных материалов, а позднее был издан сборник «Thermodynamics of Nuclear Materials» (IAEA, Vienna, 1962), в который вошли 46 докладов, представленных на симпозиум. Учитывая важность содержащихся в них сведений, представляется целесообразным дать краткие сведения о всех докладах сборника.

Используемая тематическая классификация не очень строга, так как многие доклады охватывают широкий круг вопросов и с равным правом могут быть включены и в другие разделы.

Общие вопросы термодинамики актиновидов и применение теории. Э. Веструм и Ф. Гронфольд (США) представили очень обстоятельный доклад, посвященный термодинамике окислов, сульфидов, селенидов и теллуридов актиновидных элементов. В списке использованной литературы приведено 135 наименований. Основное внимание уделено термодинамике и фазовым соотношениям в системе уран—кислород. Предложен метод оценки энтропии халькогенидных соединений и приведены величины стандартных энтропий окислов всех актиновидов и лантанидов, а также энтропий сульфидов, селенидов и теллуридов урана и тория. Впервые приводятся (табл. 1) экспериментальные термодинамические данные для сульфидов урана (при 298° К).

В докладе Р. Экермана и Р. Торна (США) путем сравнения свойств газообразных моноокисей и дву-

Таблица 1
Экспериментальные термодинамические данные для сульфидов урана при 298° К

Соединение	C_p , кал/моль·град	S° , э. е.	ΔF° , ккал/моль
US	12,08	18,63	-87
US ₂	17,84	26,42	-120
U ₂ S ₃	22,85	33,08	-127

окисей актиновидных элементов со свойствами таких же соединений других элементов объясняется двойственность химической природы актиновидных элементов. Авторы считают, что такой метод выяснения природы трансактиновидных элементов лучше, чем метод Каннингема и Гайсинского, которые рассматривают ионы в водных растворах и твердых телах.

Б. Каннингем (США) сообщает много новых сведений об америции и кюриии: типы и параметры кристаллических решеток, коэффициент теплового расширения, магнитную восприимчивость. Температура плавления америции найдена равной $995 \pm 7^\circ \text{C}$, кюриия — $1340 \pm 40^\circ \text{C}$.

М. Ранд (Великобритания) привел некоторые термодинамические данные для соединений урана, между