

ионов. В качестве инжектора будет использоваться ускоритель тяжелых ионов «Суперхилак». Ускоренные ионы предполагается использовать в ядерной физике, для радиобиологических исследований, а также для других целей (например, для калибровки ядерной аппаратуры искусственных спутников).

Существенный результат, представленный на конференции — новая технология изготовления сверхпроводящих резонаторов. В настоящее время на таких резонаторах получены рекордные результаты: добротность  $10^{10}$ , напряженность поля  $300 \text{ кВ/см}$ ; эти резонаторы не боятся нарушения вакуума. Таким образом, в настоящее время появилась возможность широко использовать сверхпроводящие резонаторы в ускорительной технике. Уже сейчас существует около 15 проектов различных ускорителей электронов, протонов и тяжелых ионов, использующих сверхпроводимость.

По накопительным кольцам наиболее интересными были сообщения о протон-протонных встречных пучках ЦЕРНа, где практически достигнуты предельные расчетные параметры (протонный ток в накопительном кольце  $12 \text{ а}$ ), а также о встречных электрон-позитронных пучках в Станфорде (светимость для встречных электронных пучков  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ).

Большой прогресс за последние годы достигнут в системах диагностики пучка частиц на ускорителе, а также в использовании ЭВМ для контроля и управления. Все последние ускорители в США уже оснащены полуавтоматическими системами управления, для чего используется стандартная электронная аппаратура и ЭВМ.

Впервые на широкой конференции докладывалось о новых установках высокоэнергетических электронных пучков. Было рассказано об установках «Аврора» и «Гидра». Первая из них дает электронный пучок с энергией  $15 \text{ Мэв}$  с током в импульсе  $1,6 \text{ млн а}$ . Вторая имеет более низкие параметры. Эти установки, по-видимому, используются только для прикладных целей как источники  $\gamma$ -излучения очень большой мощности. Существует программа их использования для осуществления управляемых термоядерных реакций.

Значительное место в плане развития ускорителей в США занимают разработки по импульсным сверхпроводящим магнитам для кольцевых ускорителей на сверхвысокие энергии и сверхпроводящим магнитам постоянного тока для транспортировки пучков частиц. Исследуются возможности создания на основе NbTi магнитов с быстрым ( $5-10 \text{ сек}$ ) и медленным ( $30 \text{ сек}$  и более) нарастанием поля до  $40-50 \text{ кэс}$ . По-видимому, в 1973 г. удастся выяснить, насколько воспроизводимыми окажутся характеристики поля для двух идентичных магнитов. Это, безусловно, в значительной мере определит программу будущего использования импульсных сверхпроводящих магнитов.

Большое внимание уделяется применению ускорителей в медицине, в частности для борьбы с раком. В настоящее время созданы установки, позволяющие точно определять локализацию опухоли, что, безусловно, приведет к более эффективному использованию ускорителей для борьбы с внутренними опухолями.

В. П. САРАНЦЕВ, И. Н. СЕМЕНЮШКИН

## В институтах и лабораториях

### Экспериментальные ядерно-физические установки НИИ ЯФЭА ТПИ

Исследования по ядерной физике и физике элементарных частиц в Томском политехническом институте (ТПИ) начались в 1947 г., когда был создан и запущен один из первых в Советском Союзе бетатронов. В 1958 г. был создан Научно-исследовательский институт ядерной физики, электроники и автоматики при ТПИ (НИИ ЯФЭА ТПИ). В настоящее время этот институт имеет малогабаритные бетатроны на  $4-6 \text{ Мэв}$ , высокоэнергетические бетатроны на  $25 \text{ Мэв}$ , микротроны на  $6$  и  $10 \text{ Мэв}$ , волноводные синхротроны на  $10$  и  $30 \text{ Мэв}$ , электронный синхротрон на  $1,5 \text{ Гэв}$ , циклотрон с диаметром полюсов  $120 \text{ см}$ , наносекундный ускоритель на  $2 \text{ Мэв}$ , электростатический генератор ЭСГ-2,5 и ядерный реактор ИРТ. На этих ускорителях сотрудники научно-исследовательских институтов и кафедр ТПИ проводят работы по физике элементарных частиц, ядерной физике, радиоактивационному анализу, радиационной физике, радиационной химии и дефектоскопии. Ниже приводятся характеристики различных установок.

**Электронный синхротрон на  $1,5 \text{ Гэв}$ .** В конце 1957 г. ТПИ была поручена разработка, сооружение и запуск электронного синхротрона на  $1,5 \text{ Гэв}$  «Сирius». Основные работы по его проектированию, изготовлению и запуску проводились в НИИ ЯФЭА ТПИ. В начале 1964 г. ускоритель был подготовлен к комплексной

наладке. В январе 1965 г. он был запущен в пониженном режиме, а в 1966 г. электроны ускорены до  $1,36 \text{ Гэв}$  при интенсивности  $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ частиц/имп}$ . Ускоритель (рис. 1) отличается следующими особенностями, определяемыми, с одной стороны, научными задачами, для решения которых создавалась установка, а с другой, — практическим осуществлением идей, возникающих при проектировании и сооружении синхротрона:

1. При слабой фокусировке синхротрон имеет высокую энергию, что наряду с большой длительностью ускорения позволяет исследовать влияние квантовых флуктуаций на движение частиц в циклических ускорителях.

2. Наиболее подходящим инжектором для синхротрона выбран микротрон. В настоящее время получаемая на нем энергия электронов равна  $6,4 \text{ Мэв}$ .

3. Использовалась инжекция на криволинейном участке. Показано, что трудности, связанные с проводкой пучка в рассеянном магнитном поле, могут быть преодолены; при этом высокое напряжение, подаваемое на инфлектор, можно снизить в три раза по сравнению с инжекцией на прямолинейном участке. Этот результат будет решающим при увеличении энергии инжекции. В частности, без изменений вводного устройства можно увеличить энергию инжекции до  $12-15 \text{ Мэв}$ .

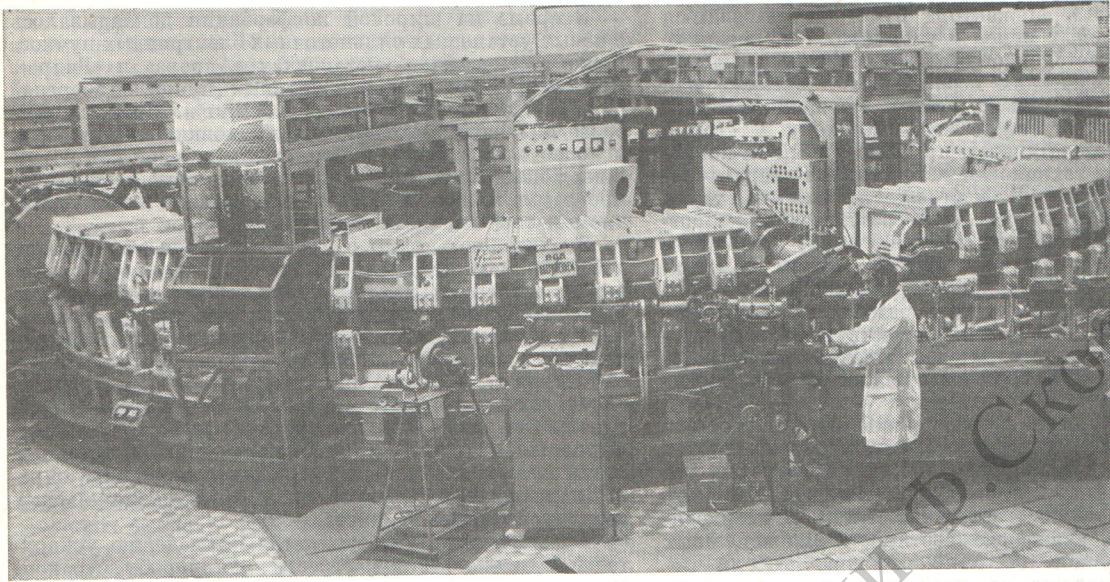


Рис. 1. Общий вид электронного синхротрона на 1,5 Гэв «Сириус».

В 1966 г. «Сириус» начал работать для физического эксперимента. Всего выработано более 15 000 ч. Одновременно проводились работы по модернизации ускорителя, в частности: ВЧ-системы, инжектора, схемы питания электромагнита. В результате этих работ интенсивность частиц в импульсе увеличена до  $2 \cdot 10^{10}$ , а частота повторения циклов с 1 до 4 гц. В настоящее время идут работы по созданию плоской части магнитного поля и выводу электронов из синхротрона.

Один из первых экспериментов на «Сириусе» — исследование влияния квантовых флуктуаций на движение частиц в циклических ускорителях. Найдено, что квантовые флуктуации синхротронного излучения вызывают возбуждение синхротронных и радиальных бетатронных колебаний. Измерено «мгновенное» распределение электронов в поперечном и продольном

направлениях и оценена граничная энергия, начиная с которой квантовое возбуждение потребует значительного увеличения ширины вакуумной камеры. Сейчас начаты работы по использованию синхротронного излучения для различных физических экспериментов.

**Волноводные синхротроны.** Цель работ по волноводным синхротронам — проверка основных положений возможности использования изогнутых замкнутых диафрагмированных (или гладких) волноводов, расположенных в межполюсном пространстве циклических ускорителей, в качестве ускоряющих систем синхротронов. В институте была достаточно хорошо разработана электродинамика замкнутых волноводных систем. Расчеты показали, что волноводные системы по потребляемой ВЧ-мощности значительно экономичнее отдельных или связанных резонаторов и позволяют получить

Технические характеристики сильноточных индукционных ускорителей

Таблица 1

Ускоритель	Характеристика					
	тип конструкции	область применения	энергия ускоренных электронов, Мэв	количество электронов, ускоренных за один цикл	частота повторения циклов, гц	мощность дозы тормозного излучения р/мин (на расстоянии 1 м от источника излучения)
СВС-3-25	«Сtereo», двухкамерный	Импульсная рентгенография	25	$10^{12}$	0,25	—
БС-1-25	Однокамерный	Радиоактивационный анализ, радиационная химия, биология	25	$3 \cdot 10^{11}$	50	1600
СВС-4-25	«Сtereo», двухкамерный	Дефектоскопия крупногабаритных промышленных изделий	15	$10^{11}$	50	400

большие приросты энергии за один оборот, а также проще компенсировать влияние квантовых флуктуаций на движение частиц.

Для проверки и подтверждения основных теоретических положений в 1963 г. был изготовлен и запущен волноводный синхротрон на 10 Мэв с ускоряющей системой в виде изогнутого замкнутого диафрагмированного волновода, а в 1965 г. — волноводный синхротрон на 10 Мэв с ускоряющей системой в виде гладкого изогнутого замкнутого волновода.

Сейчас начато сооружение волноводного синхротрона на 30 Мэв. В последние годы совместно с Радиотехническим институтом АН СССР и Ереванским физическим институтом проведена работа по обоснованию перспективности применения волноводных ускоряющих секций для ускорения протонов и электронов до высоких энергий.

**Микротроны.** Вопрос о сооружении микротронов возник в 1954 г. в связи с выбором инжектора для электронного синхротрона «Сириус». В результате разработок, проведенных в институте, были сооружены микротроны с энергией 5—10 Мэв с током в импульсе на последней орбите до 100 ма. Коэффициент вывода пучка 0,9—1,0; немоноэнергетичность не превышает 0,6%. Изготавливается микротрон на 10—20 Мэв с СВЧ-генератором мощностью 10 Мвт.

**Индукционные ускорители.** При исследованиях физических процессов ускорения электронов в бетатроне большое внимание уделялось созданию теории, объясняющей механизм инжекции. Захват электронов в ускорение рассматривался как процесс коллективного взаимодействия. Было показано, что основной фактор, влияющий на процесс захвата, — резонансное затухание колебаний на неоднородности в азимутальном распределении концентрации пространственного заряда, создаваемой пучком электронов, выходящим из инжектора. Получена подтвержденная экспериментально функциональная зависимость интенсивности излучения бетатрона от тока инжекции.

Большое внимание уделяется разработке бетатронов с высокой интенсивностью излучения и малогабаритных бетатронов. В последние годы проводились работы по созданию и исследованию сильноточных бетатронов с энергией ускоренных электронов 10—25 Мэв. Технические характеристики некоторых сильноточных бетатронов ТПИ приведены в табл. 1.

Высокоинтенсивные пучки тормозного излучения сильноточных бетатронов при использовании их для дефектоскопии позволяют просвечивать слой стали толщиной 510 мм за 40 мкс при энергии ускоренных электронов 25 Мэв. Хорошее качество рентгенографических снимков обеспечивается малыми размерами фокусного пятна (2—5 мм<sup>2</sup>).

Для стереоконтроля изделий и материалов разработан двухкамерный стереобетатрон, генерирующий два скрещивающихся пучка тормозного излучения. Большая доза стереобетатрона (по сравнению с двухлучевым однокамерным бетатроном) при высокой интенсивности тормозного излучения в каждом пучке значительно упрощает технологию и повышает производительность контроля крупногабаритных изделий и материалов. На рис. 2 показан сильноточный бетатрон на 25 Мэв. Разработаны также научно-технические основы сооружения переносных малогабаритных бетатронов на энергию 3—6 Мэв, успешно конкурирующих с радиоактивными источниками излучения. Переносные малогабаритные бетатроны предназначены для дефектоскопии металлических и неметаллических промышленных изделий и сварных соединений методом просвечивания в лабор-

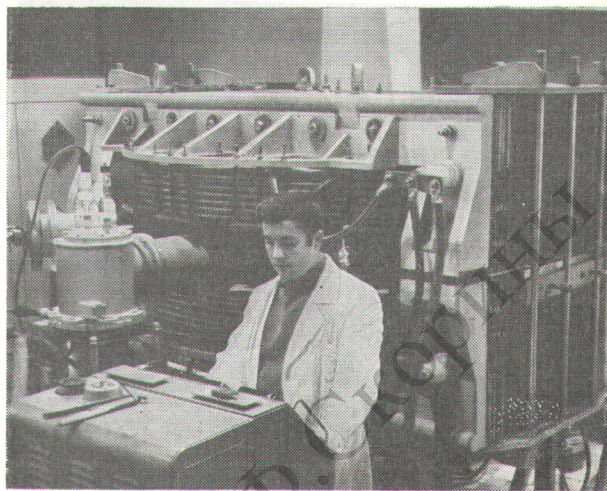


Рис. 2. Сильноточный бетатрон на энергию 25 Мэв.

тории, в цехе, на строительной площадке. Кроме того, такой ускоритель можно использовать в учебных и научных лабораториях для работ, связанных с импульсным рентгеновским излучением. На рис. 3 представлен переносный малогабаритный бетатрон типа ПМБ-6. Он состоит из трех блоков: излучателя, блока питания и пульта управления. При работе все блоки соединяются между собой гибкими кабелями. Размеры и вес блоков позволяют вручную транспортировать их к объекту контроля и проводить контроль в труднодоступных участках при выполнении монтажных и ремонтных работ. Ниже приведены основные характеристики бетатрона ПМБ-6:

Максимальная энергия ускоренных электронов, Мэв . . . . .	6
Предусмотренная регулировка энергии (ступенчато через 1 Мэв), Мэв . . . . .	2—6
Гарантированная мощность экспозиционной дозы на 1 м, мр/сек	5
Мощность, потребляемая от сети однофазного тока промышленной частоты 50 гц, напряжением 220 в, ква . . . . .	1,8
Время непрерывной работы, ч . . . . .	6
Вес блоков установки, кг:	
излучателя . . . . .	100
пульта управления . . . . .	15
блока питания . . . . .	65
Размеры установки, мм:	
излучателя . . . . .	520×400×400
пульта управления . . . . .	315×420×230
блока питания . . . . .	510×514×400

Бетатрон ПМБ-6 позволяет контролировать стальные детали толщиной до 250 мм, бетонные — до 800 мм. Регулирование энергии обеспечивает высокую (1—2%) выявляемость дефектов в широком интервале контролируемых толщин.

На одном из заводов Томска организовано мелкосерийное производство бетатронов типа ПМБ-6, которые поставляются научно-исследовательским институтам и промышленным предприятиям Советского Союза,

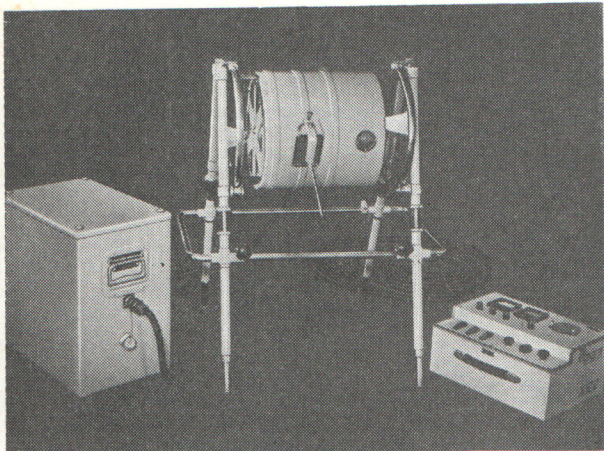


Рис. 3. Малогабаритный переносный бетатрон ПМБ-6.

экспортируются во Францию, Финляндию, Чехословакию, Венгрию и другие страны.

В настоящее время ведутся интенсивные поиски новых, более совершенных моделей малогабаритных бетатронов. Исследуется модель бетатрона с пространственной вариацией управляющего магнитного поля, которая позволит уменьшить вес электромагнита, улучшить его тепловой режим и увеличить число ускоряемых электронов. Ведутся исследования по созданию малогабаритных преобразователей на тиристорах, позволяющих значительно увеличить частоту повторения циклов ускорения в единицу времени и тем самым увеличить среднюю интенсивность излучения бетатрона.

Разрабатываются высоковольтные малогабаритные системы инжекции и проводятся исследования по повышению надежности и стабильности работы бетатрона.

**Разработка и исследование мощных наносекундных ускорителей.** Развитие техники получения высокого напряжения и формирования высоковольтных наносекундных импульсов [300–500 кВ;  $(3–10) \times 10^{-9}$  сек] и вакуумной электроники создало предпосылки для сооружения наносекундных ускорителей на малые энергии с большим током. Цель таких ускорителей — исследование свойств мощных электронных пучков. В 1969 г. был сооружен экспериментальный ускоритель со следующими параметрами:  $U = 400$  кВ;  $I = 5$  кА;  $\tau = 30 \cdot 10^{-9}$  сек. В нем использован плазменный катод, основанный на развитии плазмы при перекрытии диэлектрика в вакууме.

Сейчас сооружен ускоритель на энергию 2 МэВ с током 30–60 кА и длительностью импульса 50 нсек. Ускоритель состоит из генератора импульсных напряжений (ГИН) по схеме Аркадьева — Маркса, двойной формирующей линии (ДФЛ), коммутирующего разрядника и электронной пушки. Номинальное напряжение ГИНа с двухсторонней зарядкой 2,2 МВ, ударная емкость 11000 пФ; выполняется ГИН на конденсаторах ИМ 110/0,022 и имеет этажерочную конструкцию, в которой используются изоляторы типа ОНШ-35-2000.

Диаметр внешнего цилиндра ДФЛ 1200 мм, длина 5 м, волновое сопротивление 25 см. В качестве изоляции ДФЛ используется трансформаторное масло, в качестве изолятора — фарфоровая крышка трансфор-

матора тока ПТН-220Т с испытательным напряжением 1650 кВ.

Катодом в электронной пушке служит многоострый автоэмиссионный катод. На ускорителе планируется большой цикл работ по взаимодействию мощных электронных пучков с плазмой, генерации СВЧ-колебаний и исследованию коллективного механизма ускорения заряженных частиц. Общий вид ускорителя показан на рис. 4.

**Циклотрон.** В 1959 г. в институте был сдан в эксплуатацию циклотрон с диаметром полюсов 120 см. На этом циклотроне в процессе эксплуатации проведена большая работа по усовершенствованию многих узлов ускорителя с целью повышения надежности и улучшения параметров ускоренного пучка частиц. До 1971 г. на циклотроне ускорялись дейтроны до 13,6 МэВ,  $\alpha$ -частицы до 27 МэВ и протоны до 6,5 МэВ. Параметры ускоренного пучка дейтронов следующие: ток в максимуме 120 мкА, средний ток 50 мкА, угловая расходимость  $1^\circ$ . Для эксперимента циклотрон ежегодно вырабатывает более 6000 ч.

С учетом запросов экспериментаторов в 1971 г. была проведена работа по переводу циклотронов в режим ускорения  $\text{He}^3$  и в режим ускорения с регулированием энергии. Это потребовало выполнения большого объема работ по замене некоторых узлов резонансной системы и ВЧ-генератора, перестройке частоты ВЧ-системы от 9 до 14 МГц, а также по коррекции магнитного поля в диапазоне 9–15 кВ, созданию системы стабилизации токов питания электромагнита, созданию газозвратной системы.

В табл. 2 приведены данные о диапазоне регулирования энергии ускоряемых частиц.

**Электростатический генератор на энергию 2,5 МэВ.** Электростатический генератор на энергию 2,5 МэВ может ускорять электроны или протоны. Можно вывести пучок ускоренных электронов для облучения всевозможных объектов.

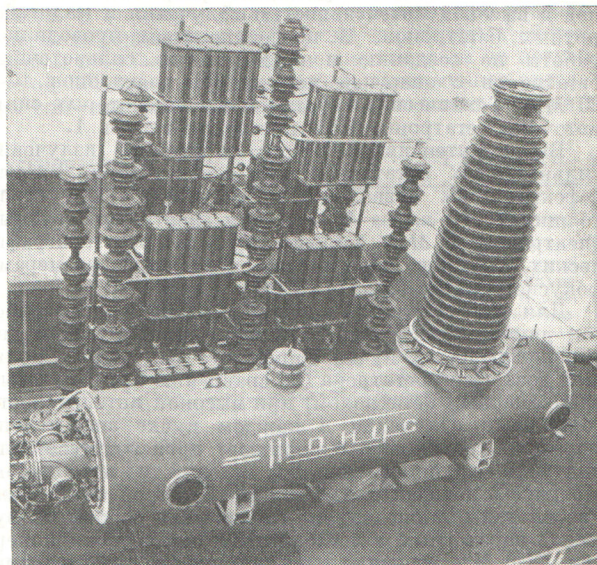


Рис. 4. Общий вид мощного наносекундного ускорителя электронов на 2 МэВ.

Диапазон регулирования энергии ускоряемых частиц, Мэв

Таблица 2

Состояние циклотрона	Ускорение на основной частоте				Ускорение на третьей гармонике		
	<i>p</i>	<i>d</i>	He4	He3	O16	O14	O12
До модернизации циклотрона	6,7	13,4	27	—	—	—	—
После модернизации циклотрона	4,5·10	9—14,5	18—29	14—30	21	18	15

Система управления ускорителем позволяет непрерывно контролировать энергию ускоренных частиц и плавно изменять ее от 0,8 до 2,5 Мэв, измерять и изменять ток выведенных электронов и определять неравномерность тока по площади. Из ускорителя выводится пучок диаметром 5 мм с током 250 мка. Сейчас ведется подготовка к переводу ускорителя в режим ускорения He<sup>3</sup>.

**Ядерный реактор.** Построенный в институте исследовательский реактор тепловых нейтронов ИРТ обеспечивает широкий круг работ по радиационной физике твердого тела, радиобиологии, активационному анализу, радиационной химии, выполняемых разными учреждениями Томска. В настоящее время реактор работает на мощности 2,5 Мвт. Он имеет 10 горизонтальных и 18 вертикальных каналов, что дает возможность одновременно вести работы различным группам экспериментаторов самостоятельно на каждом из кана-

лов. Тепловые нейтроны в девяти горизонтальных каналах отсекаются с помощью кадмиевых фильтров. На одном из горизонтальных каналов диаметром 100 мм установлен трехкристалльный спектрометр нейтронов ТК SN-400. Другой горизонтальный канал с таким же диаметром оборудован пневмотранспортным устройством диаметрами 16 и 40 мм. На шести горизонтальных каналах диаметром 100 мм и одном диаметром 150 мм установлены загрузочные устройства, позволяющие загружать испытываемые образцы в канал во время работы реактора на мощности.

На реакторе имеется радиационный индий-галлий-оловянный контур, представляющий собой источник «чистого»  $\gamma$ -излучения. Облучателю контура может быть придана любая форма по требованию эксперимента. Максимальная активность, достигаемая в контуре, составляет 75 кг-экв Ra/Мвт (мощности реактора).

Мощность дозы определяется размерами и формой облучателя. Так, в цилиндрическом полом облучателя высотой 400 мм, с внутренним диаметром 80 мм, наружным 120 мм в геометрическом центре мощность дозы составляет 1000 р/сек·Мвт, при этом неравномерность дозного поля по внутреннему каналу облучателя не превышает в среднем 15—20%, а в зоне, прилегающей к геометрическому центру, на 10 см в обе стороны по оси составляет 5—7%.

Крупные изделия (до 1 м) можно облучать либо в специальном облучателе, либо во внешнем поле. Размеры рабочей камеры, где установлен облучатель, позволяют проводить облучение таких объектов. Энергия  $\gamma$ -квантов 0,4—2,2 Мэв. Эффективная энергия не превышает 1,3—1,5 Мэв.

При реакторе имеется горячая камера для работ с активностью до 30 кг-экв Ra.

А. Н. ДИДЕНКО

## БИБЛИОГРАФИЯ

### Рецензии

Гусев Н. Г., Кимель Л. Р., Машкович В. П., Пологих Б. Г., Суворов А. П. Защита от ионизирующих излучений. Т. I. Физические основы защиты от излучений. Под ред. Гусева Н. Г. М., Атомиздат, 1969.

Учебное пособие «Защита от ионизирующих излучений» написано квалифицированными специалистами в этой области, принимающими активное участие в развитии защиты от излучений в нашей стране. Они хорошо знают теоретические и практические достижения и задачи этой области прикладной ядерной физики, имеют большой опыт издания научной литературы. Все это обусловило высокие качества вышедшего впервые в отечественной и зарубежной литературе учебного пособия. Выпуск второго тома пособия («Защита от излучений ядерно-технических установок») предполагается Атомиздатом в 1973 г.

Издание рецензируемого учебного пособия следует признать своевременным, так как широкое развитие предусмотренных решениями XXIV съезда КПСС работ по ядерной энергетике, ядерной физике, по использованию ядерных и радиационных процессов в науке и технике тесно связано с проблемой защиты от излучений.

В книге, состоящей из восьми глав, рассмотрены все основные вопросы защиты от ионизирующих излучений.

Первая (вводная) глава посвящена единицам радиоактивности и ионизирующих излучений, а также основным понятиям и терминологии. Она особенно полезна читателю, изучающим защиту от излучений без предварительного знакомства с курсом дозиметрии излучений. Во второй главе обосновываются и рассчитываются предельно допустимые уровни ионизирующих излучений. В третьей-пятой главах излагаются теоретические основы защиты от излучений. Здесь рассмотрены основные элементарные акты взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, уравнение переноса излучений, численные, аналитические, полумпирические методы расчета защиты. В шестой главе анализируется поле излучения точечных и протяженных источников за защитой (в частном случае — без защиты) с учетом геометрии задачи и самопоглощения. Защите от  $\gamma$ -квантов и нейтронов посвящены последние две главы, где наряду с рассмотрением физических закономерностей распространения излучений в среде приводятся практические методы расчета защиты для наиболее важных случаев. Здесь же рассмотрены альbedo излучений