



Циклотрон с диаметром полюсов магнита 120 см

*А. Г. Алексеев, М. А. Гашев, Д. Л. Дондыш, И. Ф. Малышев,
И. М. Матара, Е. С. Миронов, Н. А. Моносзон, Л. М. Неменов,
В. В. Пироговский, Н. А. Романов, Н. С. Стрельцов, Н. Д. Федоров*

Приводятся основные сведения о циклотронной установке с диаметром полюсов магнита 120 см. Описаны размещение основного оборудования установки, конструктивные особенности отдельных ее узлов, высокочастотное (ВЧ) оборудование, методика измерения и коррекции магнитного поля, особенности системы отклонения и фокусировки пучка на удаленную мишень. Дейтоны в циклотроне ускоряются до энергии 13,7 Мэв. Применение отклоняющей системы с фокусирующим действием позволило использовать магнитные квадрупольные линзы с малой апертурой и довести до удаленной мишени практически весь отклоненный пучок. Параметры установки позволяют в дальнейшем значительно увеличить энергию ускоренных ионов.

В 1955 г. перед Научно-исследовательским институтом электрофизической аппаратуры и группой сотрудников Института атомной энергии АН СССР была поставлена задача: разработать типовой циклотрон для получения интенсивных пучков протонов, ионов молекулярного водорода, дейтонов, α -частицы многозарядных ионов. Требовалось, чтобы этот циклотрон был надежным в работе, сравнительно простым в эксплуатации и имел достаточно эффективную защиту от проникающего излучения. Для проведения опытов при минимальном уровне фонового излучения циклотрона пучок ионов направляется через основную защитную стену в экспериментальный зал, имеющий самостоятельную защиту. Были созданы условия для опытов с быстрыми нейтронами и для определения их спектра по времени пролета. Циклотрон может также использоваться для получения искусственных радиоактивных изотопов. При проектировании циклотронной установки уделялось серьезное внимание технике радиационной безопасности; управление основными операциями производится дистанционно.

Циклотронная лаборатория размещена в двухэтажном здании с цокольным этажом. На рис. 1 показаны план первого этажа цик-

лотронной лаборатории и расположение оборудования. Часть вспомогательного оборудования размещена в цокольном этаже. На втором этаже находятся лаборатории, библиотека, конструкторское бюро и другие помещения.

Строительная часть проекта типовой циклотронной лаборатории была выполнена Ленинградским проектным институтом.

Электромагнит и коррекция магнитного поля

Электромагнит циклотрона схематически представлен на рис. 2. Балки и стойки электромагнита изготовлены из трех пакетов, набранных из листов Ст-3 толщиной 40 мм. Вес наиболее тяжелого пакета не превышает 12,5 т, что позволяет производить монтаж и демонтаж электромагнита в циклотронном зале при помощи мостового крана грузоподъемностью 15 т.

Обмотка электромагнита состоит из двух последовательно соединенных катушек весом 7,5 т, выполненных из медной трубки размерами 20 × 5 мм. Каждая катушка имеет 7 секций, охлаждаемых дистиллированной водой; все 14 секций обмотки присоединены параллельно к водораспределителю. Для

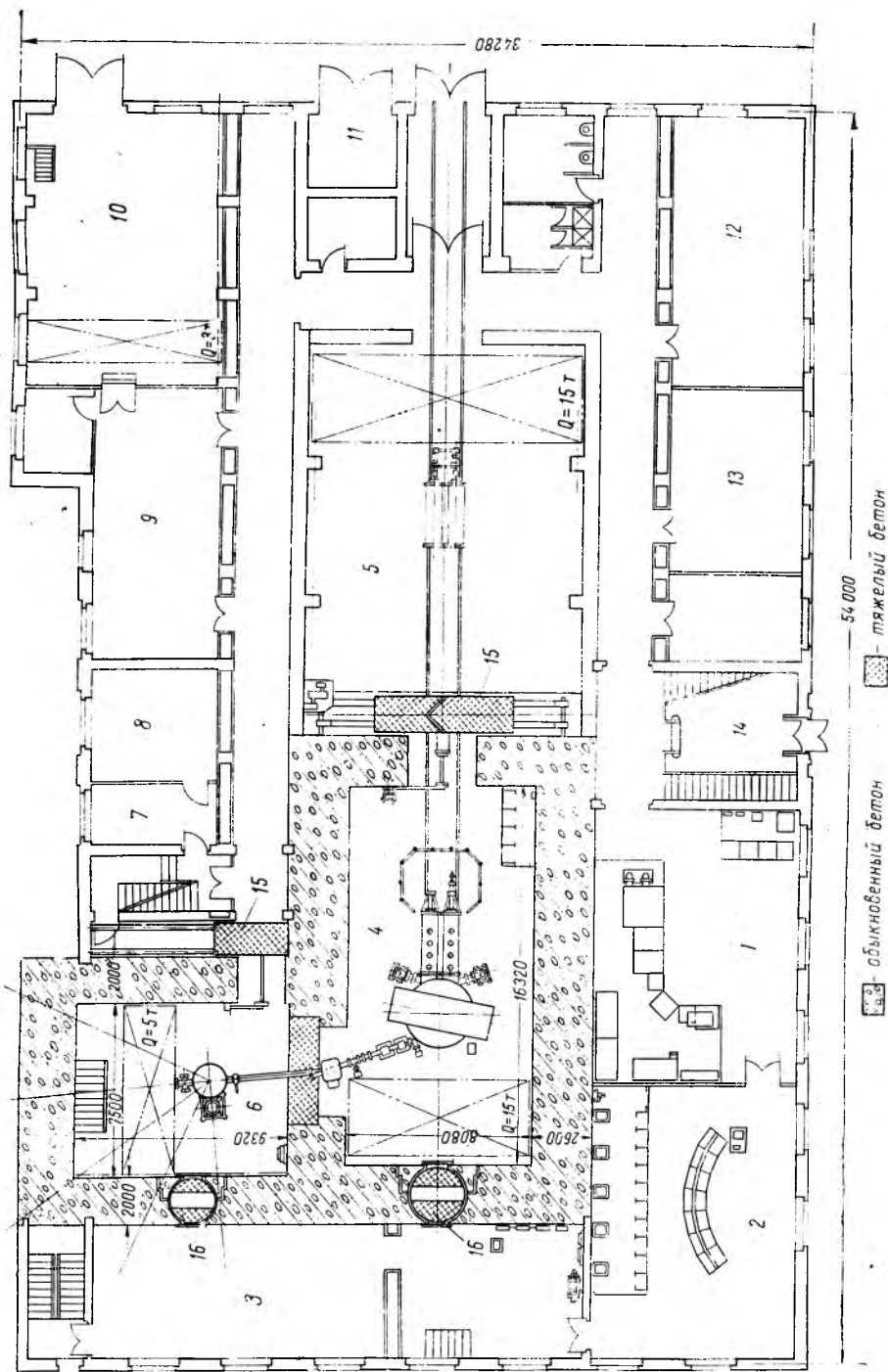


Рис. 1. План первого этажа.

1—помещение для ВЧ-установки; 2—центральный пульт управления; 3—помещение для измерительной аппаратуры при работе с нейтронными пучками; 4—циклонотронный зал; 5—вспомогательный зал; 6—экспериментальный зал; 7—нислотная; 8—аккумуляторная; 9—считывающая; 10—машинный зал; 11—трансформаторная подстанция; 12—механическая мастерская; 13—лаборатория физического обслуживания; 14—машинный зал; 15—откатные защитные ворота; 16—ходы с поворотными защитными блоками.

контроля протекания воды в каждой параллельной ветви установлено струйное реле.

Диаметр полюсных наконечников электромагнита и крышек камеры 1200 мм, расстояние между полюсами 345 мм, толщина крышек 72,5 мм, зазор между крышками 170 мм. На полюсах электромагнита установлены две вспомогательные неохлаждаемые обмотки по 500 витков каждая, рассчитанные на максимальный ток 5 а.

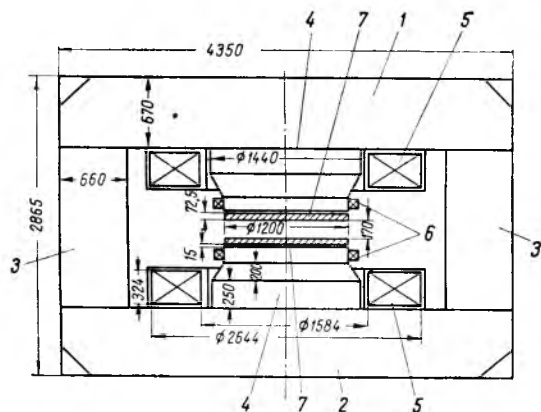


Рис. 2. Схематический разрез электромагнита:

1—верхняя балка; 2—нижняя балка; 3—вертикальные стойки; 4—полюсные наконечники; 5—основные обмотки электромагнита; 6—вспомогательные обмотки; 7—крышки ускорительной камеры.

Питание основных обмоток электромагнита производится от мотор-генератора постоянного тока мощностью 135 квт. Ток в обмотках стабилизируется с точностью $\pm 0,03\%$ при изменении напряжения сети на $\pm 10\%$ и частоты на $\pm 2\%$. Стабилизация производится с помощью стандартного устройства БТ-4, реагирующего на изменение напряжения на шунте, включенном в цепь обмотки электромагнита. Ток регулируется потенциометром, находящимся на центральном пульте управления.

Расчет и конструирование электромагнита выполнены Н. Н. Индюковым, Е. А. Безгачевым и А. В. Климовым под руководством Б. В. Рождественского и Б. Е. Грицкова.

Кривая намагничивания измерялась абсолютным методом с помощью поворотной цилиндрической катушки, помещенной в центре рабочего зазора ускорительной камеры. Измерение радиального спада магнитного поля производилось дифференциальным методом. Радиальная координата подвижной

катушки определялась с точностью $\pm 0,5$ мм. Ошибки измерений напряженности поля не превышали 0,01% от величины поля в центре. Ошибки при измерениях азимутальной неоднородности составляли 0,007% от величины поля в центре. Положение средней магнитной поверхности определялось по принципу магнитных весов, разработанных В. В. Пироговским.

Чтобы исследовать влияние положения средней плоскости магнитного поля на вертикальное смещение пучка, использовались вспомогательные катушки на полюсах электромагнита (см. рис. 2). Катушки включены навстречу друг другу так, что вертикальные составляющие их полей взаимно компенсируются, а радиальные — складываются. С помощью этих катушек можно перемещать пучок ускоряемых частиц в камере по вертикали без нарушения условия резонанса.

Конечный радиус циклотрона равен 525 мм. Полный спад поля на этом радиусе достигает 2%. Для коррекции магнитного поля используются как внутренние кольца, так и диски, расположенные в зазорах между полюсами электромагнита и крышками камеры. Величина каждого зазора 15 мм.

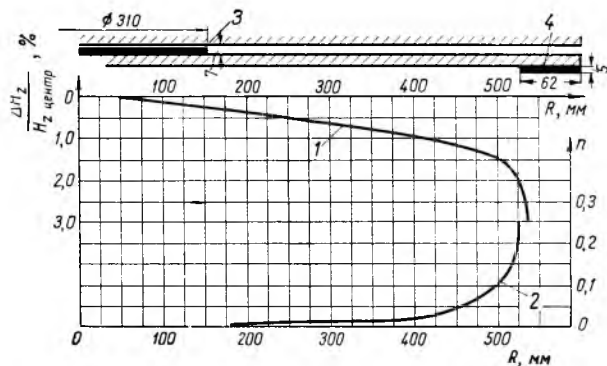


Рис. 3. Зависимость напряженности и показателя спада магнитного поля от радиуса:

1—кривая изменения напряженности магнитного поля $\frac{\Delta H_z}{H_z \text{ центр}}$ ($H_z \text{ центр} = 14,7$ кэ); 2—кривая изменения логарифмического показателя спада магнитного поля n ; 3—внешний корректирующий диск; 4—внутреннее корректирующее кольцо.

На рис. 3 изображены зависимости напряженности и показателя спада магнитного поля от радиуса. Там же приведены размеры внутренних и наружных корректирующих элементов.

Азимутальная коррекция магнитного поля осуществляется при помощи стальных полос ($5 \times 100 \times 250$ мм³), перемещаемых в радиальном направлении в зазорах между полюсными наконечниками и крышками. Перемещение производится с центрального пульта управления, где находятся индикаторы, указывающие положение полос.

Амплитуда первой гармоники азимутальной неоднородности магнитного поля в рабочей области до коррекции не превышала 6—10 э, а после коррекции—3 э.

Средняя плоскость магнитного поля смещена от средней плоскости камеры не более чем на 5 мм.

Конструкция камеры резонансных линий и дуантов

Корпус камеры выполнен из отдельных алюминиевых плит, соединения которых уплотняются резиновыми прокладками. Крышки камеры и внутренние корректирующие кольца выполнены из Ст-3. Внутренние поверхности крышек камеры и корректирующие кольца имеют гальваническое покрытие из меди толщиной в 0,05 мм, обеспечивающее необходимую проводимость для токов высокой частоты. Электрическое соединение между крышками и горизонтальными плитами камеры создается системой пружинных контактов. Положение крышек относительно друг друга определяется жесткостью и точностью изготовления корпуса камеры; непараллельность плоскостей крышек внутри камеры менее 0,05 мм. С помощью четырех катков, установленных на корпусе камеры, она выкатывается из зазора электромагнита по специальным рельсам.

Резонансная система циклотрона состоит из двух коаксиальных линий, переходного участка (горловины), камеры и дуантов (рис. 4). Баки коаксиальных линий и горловина выполнены из стали и плакированы внутри медными листами, к которым припаяны трубки водяного охлаждения. Конструкция фланцевых соединений баков резонансных линий с горловиной и горловины с камерой обеспечивает надежный электрический контакт. Штоки резонансной системы, на которых крепятся дуанты, представляют собой дюралюминиевые балки, плакированные медными цилиндрами с водяным охла-

ждением. Перемещение дуантов в вертикальной и горизонтальной плоскостях и поворот их вокруг оси штоков без нарушения вакуума осуществляются с помощью юстировочных устройств, установленных снаружи на концах резонансных линий.

Изменение длины волны собственных колебаний резонансного контура в пределах от 18 до 34 м достигается перемещением закорачивающих пластин с пружинными контактами. Пластины снабжены механизмом, который обеспечивает ослабление контактов при перемещении и поджим их в неподвижном положении. Смещение пластин без нарушения вакуума производится специальными механизмами, установленными на концах резонансных линий. Точная подстройка частоты контура производится дистанционно путем изменения положения пластин (триммеров) относительно дуантов.

Дуанты представляют собой жесткий дюралюминиевый каркас, обшитый медными листами толщиной 1,5 мм. Припаянные к листам трубки охлаждения обращены внутрь полости дуантов. Для уменьшения активации ускоряемыми частицами трубки закрыты графитовыми экранами. Высота дуантов 86 мм (в свету 70 мм).

В центральной части дуантов установлены охлаждаемые водой съемные выступы, уменьшающие эффективную ширину ускоряющего промежутка. В одном из дуантов находится отклоняющая система.

Для удобства монтажа и частичной разборки установки резонансные линии с дуантами могут откатываться от камеры на специальной тележке, причем разъем системы производится вне обмоток электромагнита в месте соединения баков с горловиной. Вакуумные агрегаты, присоединенные к горловине, при этой операции остаются на месте. Тележка перемещается по рельсовому пути, в конце которого установлена опора, предназначенная для монтажа и демонтажа штоков и юстировочных устройств резонансных линий. Для монтажа и демонтажа ускорительной камеры с присоединенной к ней горловиной используется специальная тележка. На тележке имеются рельсы, стыкующиеся с рельсами для установки камеры. Ускорительная камера и резонансные линии сконструированы А. И. Алябевым, И. Ф. Жуковым и Н. Н. Румянцевым под руководством Б. И. Продувнова.

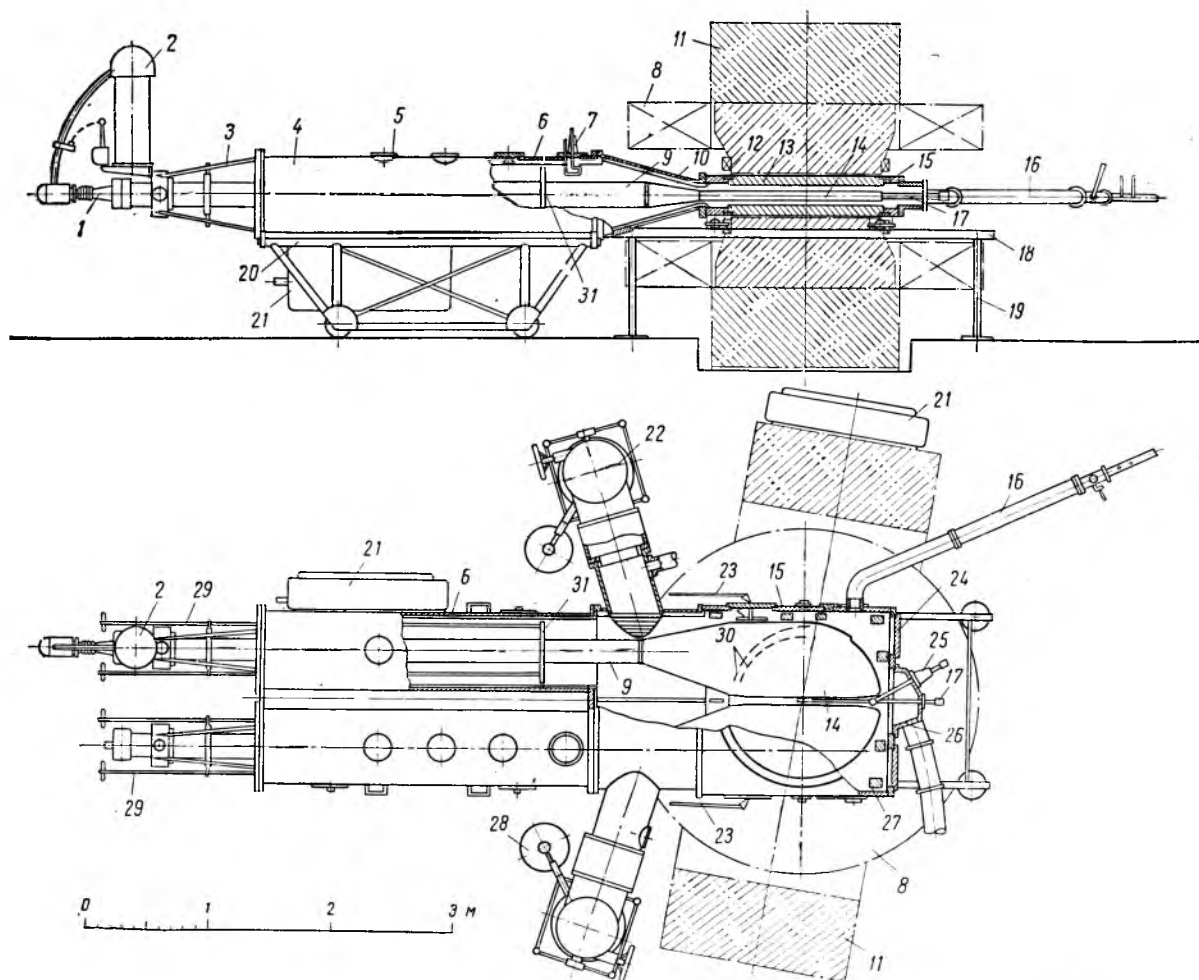


Рис. 4. Схема расположения элементов ускорительной камеры и резонансных линий:

1—проходной изолятор высоковольтного ввода отклоняющей системы; 2—винипластовый змеевик системы охлаждения потенциального электрода отклоняющей системы; 3—жестовочное устройство дуантов; 4—баки резонансных линий; 5—люки для установки витков связи; 6—медная плакировка; 7—виток связи; 8—катушка электромагнита; 9—шток резонансной линии; 10—горловина; 11—ядро электромагнита; 12—вспомогательные обмотки; 13—крышка ускорительной камеры; 14—дуанты; 15—корпус ускорительной камеры; 16—трубопровод к вакуумным манометрам; 17—ионный источник; 18—рельсы для установки ускорительной камеры; 19—опоры для рельсов; 20—тележка; 21—водораспределительный шит; 22—вакуумные агрегаты; 23—триммеры; 24—смотровые окна; 25—вращающийся зонд; 26—выпускное окно; 27—опоры для придания жесткости ускорительной камере; 28—сосуды Джара с жидким азотом; 29—фиксаторы контактов закорачивающих пластин; 30—отклоняющая система; 31—закорачивающая пластина.

Резонансная система и ВЧ-генератор

Добротность резонансной системы циклотрона, определенная с помощью генератора стандартных сигналов, при атмосферном давлении в камере равна 5000.

Питание резонансной системы циклотрона производится от многокаскадного генератора двумя коаксиальными фидерами через витки связи, установленные на баках линий. ВЧ-генератор может работать в диапазоне длин волн от 18 до 36 м с колебательной

мощностью 120 квт. При этой мощности разность потенциалов между дуантами составляет 160÷200 кв. В случае необходимости генератор может работать в форсированном режиме.

Блок-схема ВЧ-установки показана на рис. 5. ВЧ-генератор состоит из четырехкаскадного возбудителя с плавным изменением частоты и пятикаскадного усилителя мощности. Связь между последним (пятым) каскадом и фидером емкостная.

Первый каскад усилителя мощности, являющийся переходным от однотактного возбуждателя к последующим двухтактным каскадам, собран по однотактной схеме на пентоде ГУ-80 и имеет симметричный анодный контур. Второй каскад выполнен по двухтактной схеме также на пентодах ГУ-80. В последующих каскадах усилителя мощности применены триоды с дисковыми выводами сетки (в третьем—ГУ-10А, в четвертом—ГУ-22А и в пятом—ГУ-23). Лампы этой конструкции отличаются минимальной индуктивностью вывода сетки и малой емкостью промежутка анод—катод.

Использование пентодов и схемы каскадов с общей сеткой обеспечивает устойчивую работу генератора в требуемом диапазоне волн без специальной нейтрализации.

ВЧ-генератор имеет достаточно высокую стабильность частоты (не ниже 10^{-4}) и позволяет простыми средствами изменять в широких пределах частоту и напряжение на дуантах.

В условиях тренировки при частых пробоях в камере образуется глеющий разряд, который может повредить дуанты. Поэтому предусмотрен перевод усилителя мощности генератора в режим работы с самовозбуждением. Для этого напряжение обратной связи с резонансного контура циклотрона подается на сетку первого каскада усилителя мощности через отдельный фидер и специальный фазовращатель. В этом случае во время пробоев условия для самовозбуждения ухудшаются и напряжение на дуантах автоматически снижается.

Схема генератора позволяет применять импульсное питание дуантного контура для отра-

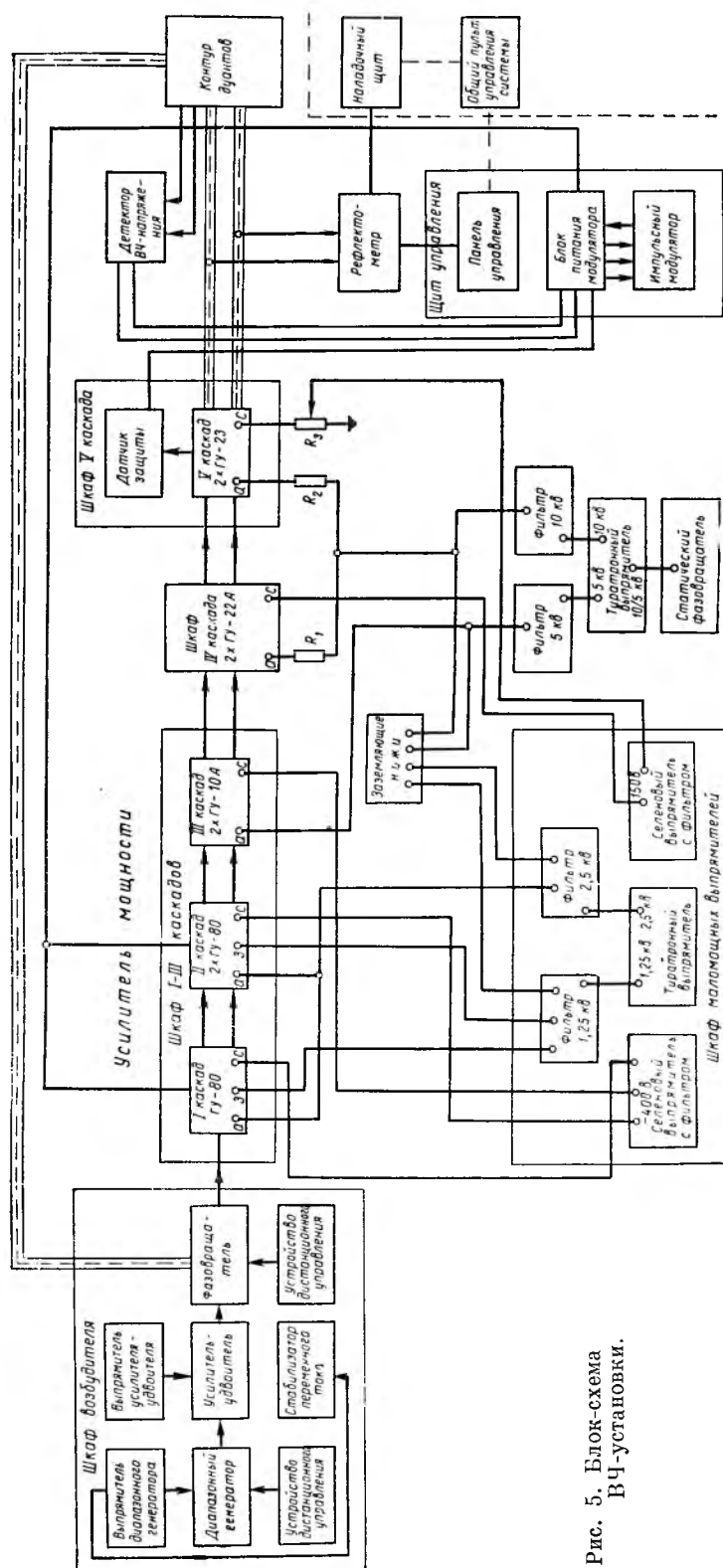


Рис. 5. Блок-схема ВЧ-установки.

ботки новых режимов в условиях минимальной активации и для проведения специальных исследований. Для этой цели служит модулятор, генерирующий импульсы переменной длительности с частотой повторения от 5 до 300 гц, подводимые к сеткам каскадов I и II усилителя мощности. Модулятор используется также в схеме автоматики для защиты дуантов и ламп генератора от случайных интенсивных пробоев. Система защиты действует и в безимпульсном режиме работы генератора.

Тиратронный выпрямитель ВЧ-генератора питается от четырехмашинного преобразовательного агрегата, позволяющего плавно изменять и стабилизировать с точностью до 1% анодное напряжение генераторных ламп. Напряжение на дуантах регулируется с центрального пульта управления изменением анодного напряжения каскадов *IV* и *V* усилителя мощности.

Проект ВЧ-генератора выполнен в лаборатории Г. М. Драбкина Р. В. Ванатовским, Р. Ю. Протасовским и Ю. Ф. Цибульским под руководством А. С. Темкина.

Вакуумная система

Ускорительная камера и резонансные линии откачиваются двумя паромасляными вакуумными агрегатами ВА5-4 с суммарной производительностью не менее 2500 л/сек.

Два вакуумных агрегата ВАО5-1 создают необходимое разрежение в трубопроводе, по которому ионный пучок выводится на удаленную мишень. Суммарная производительность этих агрегатов не менее 250 л/сек. Объем, где устанавливается мишень, откачивается одним агрегатом ВА2-3 производительностью 500 л/сек.

Вакуумные агрегаты снабжены азотными ловушками для конденсации масляных паров. Все агрегаты имеют клапаны с ручным и дистанционным приводами, автоматически срабатывающие при ухудшении вакуума. Производительность насосов указана с учетом потерь в азотных ловушках и клапанах для давления $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Предварительное разрежение для работы диффузионных насосов создается двумя механическими насосами ВН-7. Черновая откачка производится через отдельный трубопровод, непосредственно соединенный с камерой циклотрона и другими откачиваемыми

объемами. Дистанционный контроль вакуума в заранее выбранных местах установки обеспечивается ионизационными, магнитно-разрядными и термолучевыми манометрами. Специальные шлюзовые устройства позволяют производить смену испорченных манометров без нарушения вакуума. Приборы для контроля вакуума и световая сигнализация установлены в помещении центрального пульта управления.

Расчет вакуумной системы произведен
Я. Л. Михелисом и Н. М. Карпенко.

Центральная часть циклотрона и источник ионов

Начальное движение ионов играет существенную роль в процессе ускорения [1,2].

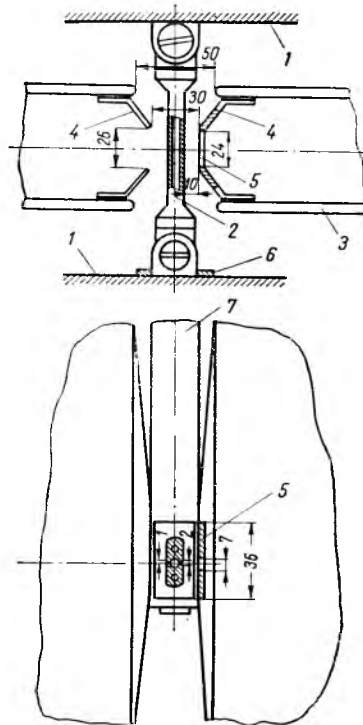


Рис. 6. Источник ионов и центральная часть дуантов:

1—крышки ускорительной камеры; 2—головка ионного источника; 3—извлекающий дуант; 4—выступы дуантов; 5—плоская часть выступа со щелью; 6—направляющие для установки корпуса источника ионов; 7—корпус ионного источника.

Расчеты движения ионов для данного циклотрона были выполнены И. М. Матора.

Для уменьшения энергетического разброса во внешнем пучке заряженных частиц ио-

ны из источника извлекаются в один дуант. Чтобы ослабить фазовую группировку ионов, расстояние между кромками дуантов по горизонтали и вертикали уменьшено с помощью специальных съемных выступов (рис. 6). На извлекающем дуанте выступ имеет плоский электрод со щелью 7×25 мм², что практически устраняет неоднородность электрического поля, вызывающую дефокусировку пучка ионов по вертикали. Геометрия центра выбрана после расчета начального движения частиц.

В циклотроне применен источник ионов целевого типа с калящимся катодом (танталовая нить диаметром 3 мм). Смена нити в источнике производится без нарушения вакуума. Подача газа в источник обеспечивается при помощи специального стенда [3].

При питании источника дейтерием или водородом из него может быть извлечен в дуант ток до 30—40 мА. Изменением места подачи водорода в газоразрядную полость можно создать преимущественно либо ионы атомарного, либо ионы молекулярного водорода. Ток α -частиц, извлекаемых из источника при подаче гелия, примерно в 10—15 раз меньше тока дейтонов.

Отклоняющая система и фокусировка пучка на удаленную мишень

В описываемом циклотроне применена отклоняющая система с неоднородным электрическим полем [4,5]. Расчет отклоняющей системы, установленной в данном циклотроне, выполнен И. М. Матора. Преимущество такой системы перед обычными (с однородным полем) заключается в том, что, помимо отклонения пучка заряженных частиц, она компенсирует дефокусирующее действие поля рассеяния магнита.

Отклоняющая система (рис. 7) состоит из двух частей. Первая часть, практически не отличающаяся от используемой обычно системы, имеет протяженность по азимуту 40°. Расстояние между электродами изменяется от 6 (в начале) до 12 мм (в конце). Заземленный электрод этой части системы изготовляется из тантала или вольфрама толщиной 0,2—0,8 мм.

Электроды второй части отклоняющей системы имеют в сечении гиперболическую форму. Протяженность этой части системы по азимуту составляет 60°. Расстояние между

электродами равно 16 мм. Заземленный электрод этой части системы изготовляется из графита. Все электроды отклоняющей системы охлаждаются водой. Электрическая прочность отклоняющей системы позволяет подводить к ней напряжение до 70 кВ. Источником напряжения служит кенотронный выпрямитель на 100 кВ. Коэффициент выпуска отклоняющей системы составляет 40—50%.

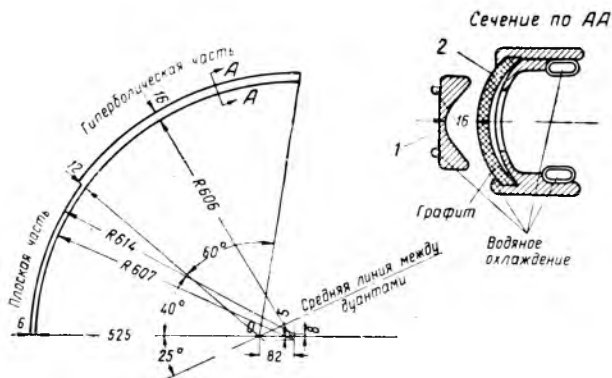


Рис. 7. Схема отклоняющей системы: 1—потенциальный электрод (уравнение профиля $x^2 - y^2 = 10,8$ мм²); 2—заземленный электрод (уравнение профиля $x^2 - y^2 = 26,8$ мм²).

Расстояние от выпускного патрубка до мишени, установленной в экспериментальном зале, равно 9 м. Расходящийся пучок за выходным патрубком фокусируется двумя магнитными квадрупольными линзами (рис. 8). Применение магнитных линз, как известно, позволяет в широких пределах перемещать фокус вдоль оптической оси. Благодаря фокусирующему действию отклоняющей системы оказалось возможным применить квадрупольные линзы МЛ-5 со сравнительно небольшой апертурой (139 мм). Оптический расчет системы фокусировки выведенного пучка выполнен Ю. Г. Басаргиным.

Градиент магнитного поля в линзах 350 э/см. Номинальный ток возбуждения 60 А. Постоянство тока в пределах $\pm 1\%$ обеспечивается стабилизатором. Охлаждение обмоток магнитных линз водяное.

Магнитные линзы могут перемещаться в вертикальном направлении на ± 20 мм и в горизонтальном направлении (вдоль и поперек оси вакуумной трубы) на ± 10 мм. Диаметр вакуумной трубы, по которой выводится пучок заряженных частиц, составляет 100 мм. Расчет и конструирование магнитных

квадруольных линз выполнены Н. А. Островским и Н. И. Коноваловой.

Чтобы снизить в экспериментальном зале уровень нейтронного фона от циклотрона, используется электромагнит, изменяющий

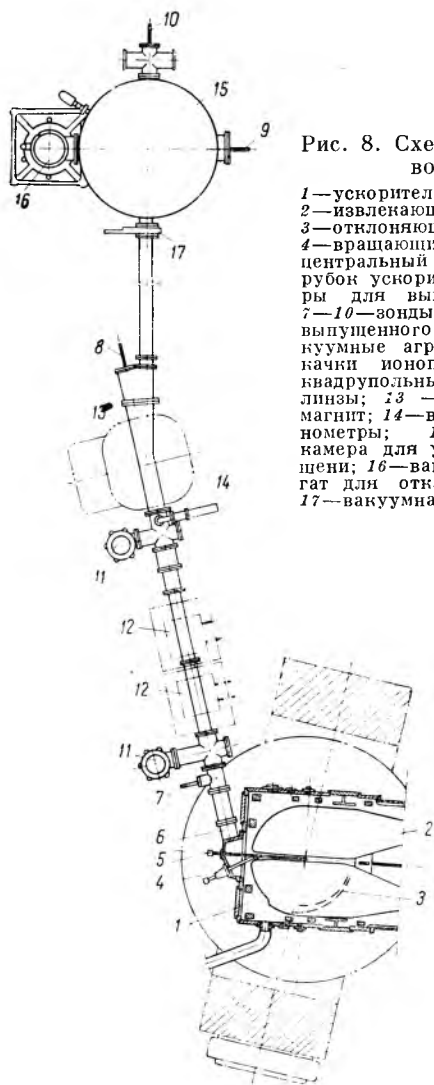


Рис. 8. Схема ионопровода:

- 1—ускорительная камера;
- 2—извлекающий дуант;
- 3—отклоняющая система;
- 4—вращающийся зонд; 5—центральный зонд; 6—патрубок ускорительной камеры для выпуска пучка;
- 7—10—зонды для контроля выпущенного пучка; 11—вакуумные агрегаты для откачки ионопровода; 12—квадруольные магнитные линзы; 13—отклоняющий магнит; 14—вакуумные манометры; 15—вакуумная камера для установки мишени; 16—вакуумный агрегат для откачки камеры; 17—вакуумная задвижка.

направление пучка на 13° . Полюса электромагнита имеют форму трапеции со сторонами 366 и 434 мм и высотой 300 мм. При токе в обмотках, равном 21 а (напряжение 110 в), в зазоре между полюсами (100 мм) может быть создано магнитное поле напряженностью 4500 э.

Для измерения тока пучка, распределения интенсивности по его сечению и для получения радиоактивных изотопов цикло-

тронная установка снабжена специальными зондами. На рис. 8 схематически изображено их расположение. Зонд 5 служит для измерения тока ионов внутри ускорительной камеры на различных радиусах (от 50 до 525 мм). Он может быть также использован для измерения тока отклоненного пучка. Зонд перемещается дистанционно с помощью электропривода. Положение зонда отмечается на центральном пульте управления. Зонд 4 предназначен для получения радиоактивных изотопов. Благодаря вращению зонда пучок ионов распределяется по большой поверхности, что уменьшает удельную тепловую нагрузку. Многоэлектродные зонды 7—10 позволяют измерять распределение тока в пучке как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Эти зонды используются в основном при наладке фокусирующей системы выпуска пучка и частично для контроля работы циклотрона.

Закключение

На циклотронной установке были ускорены дейтоны до энергии 13,7 Мэв, при этом ток на конечном радиусе был более 1 ма. Коэффициент выпуска примененной отклоняющей системы составлял 40—50 %.

Фокусирующее действие отклоняющей системы дало возможность применить магнитные квадруольные линзы с малой апертурой и довести до мишени, установленной в экспериментальном зале, практически весь ток отклоненного пучка.

Примененная конструкция наконечника отсекающего электрода отклоняющей системы не позволяет выдерживать длительную тепловую нагрузку, создаваемую током более 1 ма, полученным на конечном радиусе. Поэтому ток в отклоненном пучке практически доводится только до 100—200 мка. Сечение пучка, сфокусированного на удаленную мишень, составляет $15 \times 20 \text{ мм}^2$, что дает значение плотности тока на мишени 40—80 мка/см². Такие токи являются более чем достаточными для подавляющего большинства проводимых исследований и позволяют также получать радиоактивные изотопы вне ускорительной камеры.

Есть все основания предполагать, что энергии дейтонов на этом циклотроне может быть доведена до 15—16 Мэв при сравнительно небольшом снижении ионного тока на конеч-

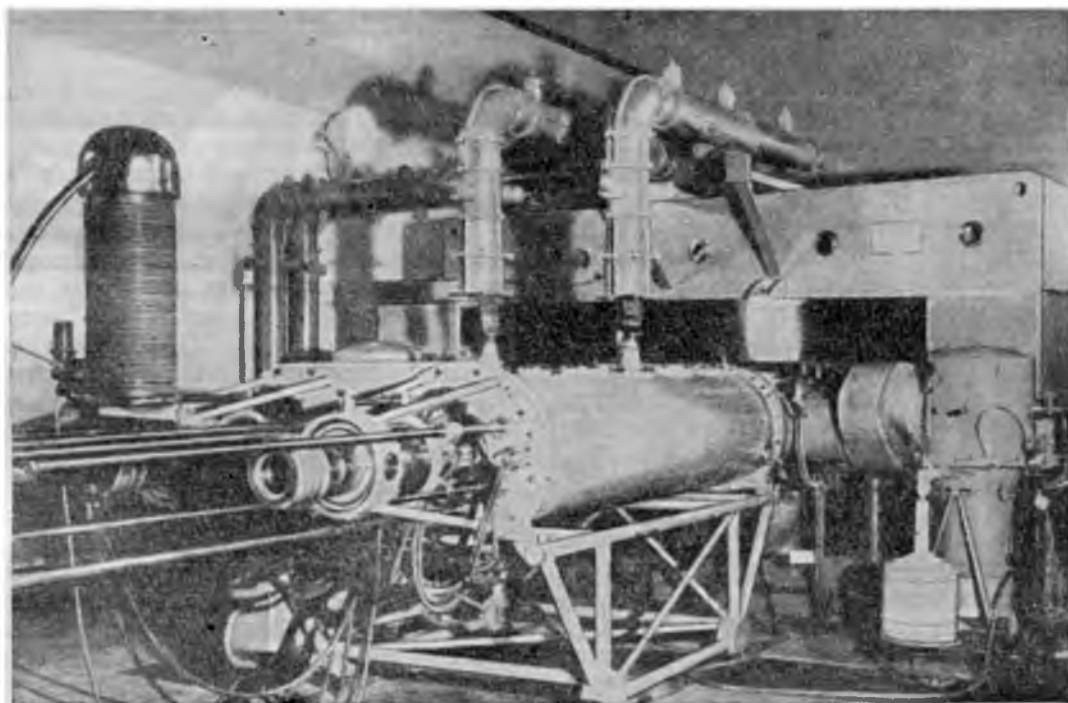


Рис. 9. Общий вид циклотронной установки со стороны резонансных линий.

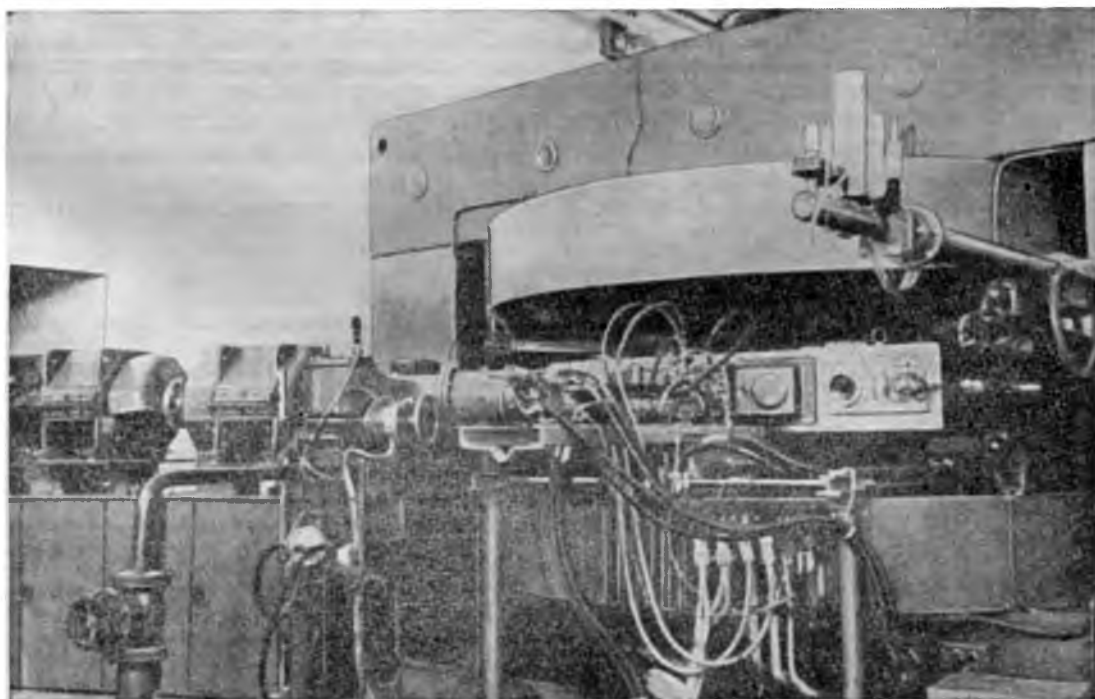


Рис. 10. Общий вид циклотронной установки со стороны системы выпуска пучка.
Слева видны магнитные квадрупольные линзы

ном радиусе. Ускоряя ионы молекулярного водорода, можно без перестройки резонансного контура циклотрона получить протоны с энергией 7,5—8 Мэв. Очевидно, что α -частицы могут быть ускорены до энергии 30—32 Мэв; при этом ток в пучке будет примерно в 10—15 раз меньше, чем в случае ускорения дейтронов и протонов. Длина волны, обеспечиваемая резонансным контуром циклотрона, и разность потенциалов между дуантами (до 200 кВ) позволяют прямым способом ускорить на этом циклотроне протоны до энергии 11 Мэв примерно при тех же токах пучка, что и для дейтронов.

Описанная циклотронная установка весьма надежна в эксплуатации. Специальные дозиметрические измерения показали, что бетонная защита от проникающего излучения полностью обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала и экспериментаторов. Система автоматики и блокировок гарантирует эксплуатацию циклотрона с соблюдением всех норм по технике безопасности.

Система управления, сигнализации, а также конструирование специального электрооборудования выполнены В. С. Люблиным, Н. Б. Невровым и П. С. Горникелем под руководством Г. С. Гордейчика.

На рис. 9 и 10 изображен внешний вид циклотронной установки. Подобные установки, изготовленные в Советском Союзе, работают сейчас в Румынской Народной

Республике, Германской Демократической Республике, Китайской Народной Республике и Польской Народной Республике. В Чехословацкой Народной Республике заканчивается сооружение такого же циклотрона.

Испытание первого образца циклотрона производилось в 1956 г. сотрудниками Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры Л. Н. Баулиным, Р. Н. Летуновским, Ю. Г. Басаргиным, А. В. Степановым, Г. А. Наливайко, М. Д. Веселовым, В. А. Сусловым и А. И. Антоновым. В испытаниях принимали также участие сотрудники Института атомной энергии АН СССР И. И. Афанасьев, А. А. Арзуманов и Р. А. Мещеров. Отклоняющая система и магнитные квадрупольные линзы испытывались сотрудниками Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры в 1956 г. на циклотроне Института физики АН УССР при участии В. А. Ковтуна. Изготовлением циклотрона руководили А. В. Мозалевский, Л. Н. Федулов, В. В. Романов и К. А. Асриев.

Авторы выражают благодарность Е. Г. Кожмару за ценные советы, Ф. К. Архангельскому за большую помощь при испытании первого образца циклотрона и Д. Г. Алхазову за обсуждение ряда вопросов, связанных с проектированием циклотрона.

Поступила в Редакцию 12/III 1959 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Д. Федоров. Атомная энергия, II, № 4, 385 (1957).
2. В. С. Панасюк. Атомная энергия, III, № 10, 341 (1957).
3. Л. Ф. Кондрашев, Л. М. Неменов, Г. М. Новиков, Ю. М. Пустовойт, Н. Н. Халдин, А. А. Чубаков. Приборы и техника эксперимента, № 3, 23 (1957).
4. Л. М. Неменов, С. П. Калинин, Л. Ф. Кондрашев, Е. С. Миронов, А. А. Наумов, В. С. Панасюк, Н. Д. Федоров, Н. Н. Халдин, А. А. Чубаков. Атомная энергия, II, № 1, 36 (1957).
5. А. А. Арзуманов, Е. С. Миронов. Атомная энергия, 6, № 2, 202 (1959).

