

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ-РЕЦИРКУЛЯТОРЫ С НЕКРУГОВЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ОРБИТАМИ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

А. Е. Дубинов^{1,2,3,*}, *Е. И. Очкина*^{1,2}

¹ Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Россия

² Саровский физико-технический институт, Саров, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет
«Московский инженерно-физический институт экспериментальной физики», Москва

ВВЕДЕНИЕ	776
КРАТКИЙ ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ-РЕЦИРКУЛЯТОРОВ: ОТ МИКРОТРОНА К РОДОТРОНУ	778
СХЕМЫ УСКОРЕНИЯ В ЭУРНО	785
Схема ускорения в родотроне с траекторией электронов в форме «цветка розы»	785
Схема ускорения в риджтроне с траекторией электронов в форме «рыбьего хребта»	788
Схема ускорения в фентроне с траекторией электронов в форме «крыльчатки вентилятора»	789
Схема ускорения в цилиндротроне	790
ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭУРНО	791
Электронные пушки	791
Ускоряющие резонаторы	791
Поворотные магниты	793
РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭУРНО	798
ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЭУРНО И ИХ ПАРАМЕТРЫ	800
Родотроны серии ТТ	800

*E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Действующий образец риджтрона	803
Действующий образец фентрона	804
ПРИМЕРЫ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭУРНО	805
Применения в технологиях материалов	805
Применения в ядерной физике и медицине	808
Применения в пищевой и сельскохозяйственной областях	809
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	809
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	810

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ-РЕЦИРКУЛЯТОРЫ С НЕКРУГОВЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ОРБИТАМИ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

А. Е. Дубинов^{1,2,3,*}, *Е. И. Очкина*^{1,2}

¹ Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Россия

² Саровский физико-технический институт, Саров, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет
«Московский инженерно-физический институт экспериментальной физики», Москва

Представлен обзор современных компактных электронных ускорителей-рециркуляторов на промежуточные энергии ускорения (десятки МэВ). Рассмотрены схемы ускорения электронов в родотроне, риджтроне, фентроне и цилиндротроне. Дано описание основных элементов ускорителей: электронных пушек, ускоряющих резонаторов и поворотных магнитов. Приведены параметры действующих ускорителей. Показаны примеры применения электронных ускорителей-рециркуляторов в различных радиационных процессах.

Review of modern compact electron accelerators-recirculators at the intermediate energies of acceleration (tens of MeV) is presented. The schemes of electrons acceleration in rhodotron, ridgetron, fantron, and cylindertron are analyzed. The main elements of the accelerators (electron guns, accelerating cavities, and bending magnets) are described. The parameters of the acting accelerators are provided. The examples of application of the electron accelerators-recirculators in different radiation processes are presented.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Современный научно-технический прогресс уже немислим без развития ускорительной техники. Сейчас трудно перечислить все мировые научные достижения, сделанные с помощью ускорителей заряженных частиц. И среди них немалая доля приходится на электронные ускорители (ЭУ).

*E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Назовем некоторые важные направления, в которых широко применяются ЭУ для научных исследований: лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) от СВЧ- до рентгеновского диапазона длин волн [1, 2], радиационная физика твердого тела [3], рентгенография быстропротекающих процессов [4], физика элементарных частиц и строение материи [5, 6] и многое другое.

Не менее разнообразны и области технологических применений ЭУ. Среди них: медицина [7], промышленная электроника [3, 8], химические процессы и новые материалы [9, 10], экология [11], легкая и пищевая промышленность [12, 13].

За свою почти вековую историю техника ЭУ достигла значительного прогресса: развивались линейные электронные ускорители (ЛУЭ) [14], включая электронные ускорители прямого действия (ЭУПД), или высоковольтные ускорители [15].

Перед разработчиками научно-исследовательских и технологических ЭУ в первую очередь стояла задача увеличения интенсивности и мощности электронного пучка, а также энергии ускоренных электронов. Но рост указанных параметров требовал увеличения длины ускоряющего пути в ЛЭУ и ЭУПД, а следовательно, и размеров самого ЭУ.

Тогда, наряду с известными ЛУЭ, были предложены циклические электронные ускорители (ЦЭУ) [16]. К ним относятся индукционный ЦЭУ — бетатрон [17–19] и высокочастотный резонансный ЦЭУ — микротрон [20–22] с круговыми или почти круговыми орбитами электронов и др. (отсюда в их названии — циклические). К подклассу высокочастотных резонансных ускорителей типа микротрона относятся электронные ускорители-рециркуляторы (ЭУР) [23].

В последние 2–3 десятилетия техника ЭУР дополнилась новыми разработками, образовавшими еще одно направление — электронные ускорители-рециркуляторы с некруговыми орбитами (ЭУРНО). Первый среди них — родотрон с орбитой, напоминающей по форме цветок розы (отсюда и его название) [24]. Позже были предложены концепции риджтрона, фентрона и цилиндротрона [25–27].

Сразу после появления статьи [24] в сообществе специалистов-разработчиков ЭУ возник определенный скепсис. Казалось, что настроить резонансный ускоритель со сложной многократно самопересекающейся электронной орбитой будет практически невозможно. Но время показало, что все трудности преодолимы, и ЭУРНО типа родотрона прекрасно работают. Был создан целый ряд действующих моделей родотронов с различными выходными характеристиками, и сейчас реализованы их серийное изготовление и поставка потребителям. Были также созданы действующие образцы риджтрона и фентрона, сведений о действующих образцах цилиндротрона пока нет.

К 2017 г. был накоплен обширный фактический материал разработки ЭУРНО, их создания и применения. Однако все эти данные находятся или

в разрозненных журнальных статьях, или трудах конференций. Цель настоящего обзора заключалась в объединении и анализе этих данных.

1. КРАТКИЙ ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ-РЕЦИРКУЛЯТОРОВ: ОТ МИКРОТРОНА К РОДОТРОНУ

Исторически первым ЦЭУ является бетатрон, описанный в диссертации Видероэ 1925 г. и опубликованный в [28]. Видероэ предложил идею бетатрона, вывел важное соотношение 1:2 между напряженностью магнитного поля на электронной орбите и средней напряженностью магнитного поля внутри этой орбиты, получившее название соотношения Видероэ, построил первый бетатрон, но запустить его не смог. Первый действующий бетатрон был создан Керстом [29]. Он имел энергию 2,2 МэВ. Причины неудачи Видероэ и описание бетатрона Керста подробно даны в [30].

В [19] представлены параметры действующих бетатронов, созданных в различных лабораториях мира. Как правило, они ускоряют электроны до энергии в несколько десятков МэВ, имеют импульсно-периодический режим работы с частотой следования импульсов несколько десятков герц. Типичный представитель современных бетатронов — установка КРАБ, имеющая следующие параметры: вес 275 кг, габариты 960 × 560 × 350 мм, энергия электронов 3–10 МэВ, мощность дозы γ -излучения 8 Р/мин при частоте импульсов 50 Гц и 16 Р/мин при частоте импульсов 100 Гц (оба значения — на расстоянии 1 м от мишени тормозного излучения) [31]. В РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) были созданы импульсные сильноточные безжелезные бетатроны, имеющие энергию до 70 МэВ [32, 33].

В бетатронах ускорение электронов происходит под действием вихревого электрического поля, возникающего при изменении напряженности магнитного поля. В процессе ускорения электроны двигаются по равновесной круговой орбите. При этом электроны все время находятся в ускоряющем азимутальном электрическом поле, не выходят из него и, следовательно, не входят туда обратно. Поэтому бетатроны нельзя отнести к классу высокочастотных резонансных ЦЭУ.

Зато другой вид ЦЭУ — микротрон — можно безоговорочно отнести к этому классу. В нем электроны многократно входят в ускоряющий резонатор и выходят из него. Схема ускорения в микротроне была предложена в 1944 г. Векслером, она основана на открытом им принципе автофазировки [34].

На рис. 1 представлена схема движения частиц в классическом микротроне. Как видно, генерация и ускорение электронов производится в одном и том же устройстве — резонаторе. Круговое движение электронов в микротроне осуществляется с последовательно увеличивающимся периодом прохождения между выходом и входом ускоряющего промежутка, что обусло-

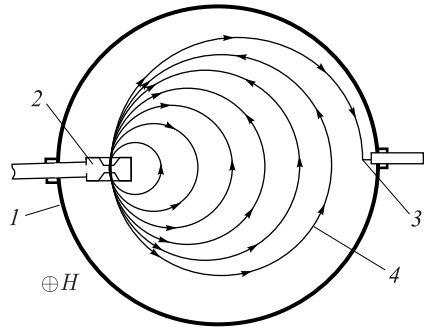


Рис. 1. Принципиальная схема ускорения в микротроне: 1 — вакуумная камера; 2 — объемный резонатор; 3 — мишень; 4 — орбита (траектория) электронного пучка (из [20])

влено возрастанием радиуса круговой орбиты с ростом энергии. Переменное электрическое поле для ускорения электронов создается СВЧ-генератором: магнетроном или в некоторых случаях клистроном.

Отметим важное обстоятельство, присущее всем микротронам: электроны на каждом входе должны попадать в ускоряющую фазу переменного электрического поля. Пользуясь терминологией, которую часто применяют к описанию режимов работы СВЧ-генераторов типа магнетрона [35], микротрон работает на $2k\pi$ -моде.

Первый микротрон был сконструирован и успешно запущен в эксплуатацию в Канаде в 1947 г. [36]. Энергия электронов на выходе составляла 4,6 МэВ. Такой и последующие подобные ускорители, называемые теперь классическими (круговыми) микротронами, имели достаточно простую конструкцию, в которой, в частности, использовались сплошные магниты.

В мире создано большое количество классических микротронов, работающих по схеме рис. 1. Многие из них описаны в [22]. В качестве примера приведем микротрон МТ-22 на энергию 22 МэВ, не рассмотренный в [22]. Он был создан в Чехословакии при участии специалистов из Дубны в 1980 г. и предназначен для медико-дозиметрических исследований, создания и исследования новых сцинтилляционных материалов, а также для наработки некоторых радионуклидов в фотоядерных реакциях [37]. На рис. 2 показана принципиальная схема МТ-22. Вот некоторые его рабочие параметры: частота СВЧ-генератора — 3 ГГц, частота повторения импульсов — 400 с^{-1} , длительность импульса — 2,5 мкс.

Отметим два очевидных недостатка классических микротронов:

- сплошные магниты, создающие однородное поле, плохо фокусируют электроны в аксиальном (перпендикулярном к плоскости рис. 1) направлении, а также на краях магнита по причине спада магнитного поля на краях;

- источником электронов является само ускоряющее устройство (например, автоэлектронная эмиссия со стенок резонатора или эмиссия с термокатада, встроенного в одну из стенок резонатора).

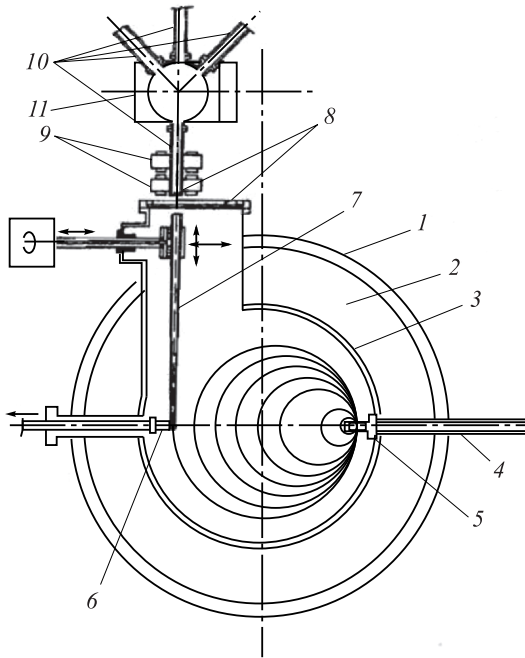


Рис. 2. Схема микротрона МТ-22: 1 — ведущий электромагнит; 2 — основные обмотки электромагнита; 3 — вакуумная камера; 4 — СВЧ-фидер; 5 — ускоряющий резонатор; 6 — токовый зонд; 7 — канал вывода пучка; 8 — тонкие выводные окна из Al; 9 — квадрупольный дублет; 10 — линии вывода электронного пучка; 11 — поворотный магнит (из [37])

Поэтому, когда для ускорения электронов до десятков МэВ понадобилось многократное их прохождение через резонатор, встали задачи усовершенствования конструкции источника электронов и улучшения магнитной фокусировки. Решить первую задачу можно путем использования специального инжектора, размещенного вне ускоряющего резонатора, а вторую — за счет, например, профилирования магнитного поля. Кроме того, не исключалось и существенное изменение схемы ускорения частиц.

Следующим удачным шагом в развитии ЭУР стала идея Швингера, предложившего разрезной микротрон (приоритет Швингера — согласно [38]), в котором магнит разделен на две части, а ускорение происходит на прямолинейных участках орбиты. Такой разрезной микротрон стал называться рейс-трековым микротроном (или просто — рейс-треком). Позже появились и другие схемы ускорения в микротронах с разрезными магнитами — бициклотрон, гексациклотрон, октотрон и др., все построенные на поворотных

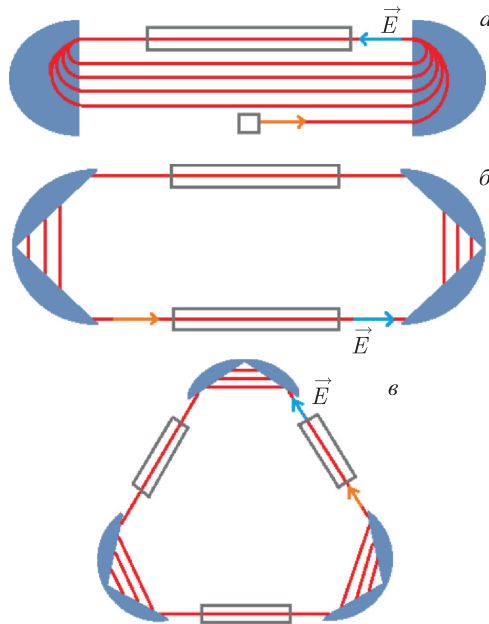


Рис. 3. Схемы ускорения в разрезных микротронах (по [22]): а) рейс-трековый микротрон; б) бициклотрон; в) гексациклотрон

магнитах (рис. 3). Их достоинства по сравнению с классическим микротроном заключаются в уменьшении суммарного объема и веса магнитов, а также в увеличении энергии, набираемой электронами за один оборот. Однако, как оказалось, подобные схемы разрезных микротронов наиболее пригодны для ускорителей на субГэВ-ные и ГэВ-ные энергии, что мало подходит для технологических приложений. Кроме того, стало понятно, что площадь, охватываемая орбитами, в них достаточно велика, в результате чего ускорители, построенные по любой из таких схем, часто оказываются очень громоздкими.

Первый разрезной микротрон был создан в Канаде в 1961 г. (рис. 4) [39]. Энергия электронов на выходе составила 4–12 МэВ. Большой проблемой данного ускорителя оказалось аксиальное расхождение пучка на краях электромагнита, которая была решена в 1967 г. Бабичем и Седлачком введением дополнительного магнитного поля противоположной направленности в этой области [40].

В 1970 г. в США был запущен шестиоборотный рейс-трековый микротрон на 19 МэВ [41] со сверхпроводящим ЛУЭ в качестве ускоряющей секции. Ускоритель со сверхпроводящей электродинамической структурой может работать с меньшей вводимой в резонаторы СВЧ-мощностью, что по-

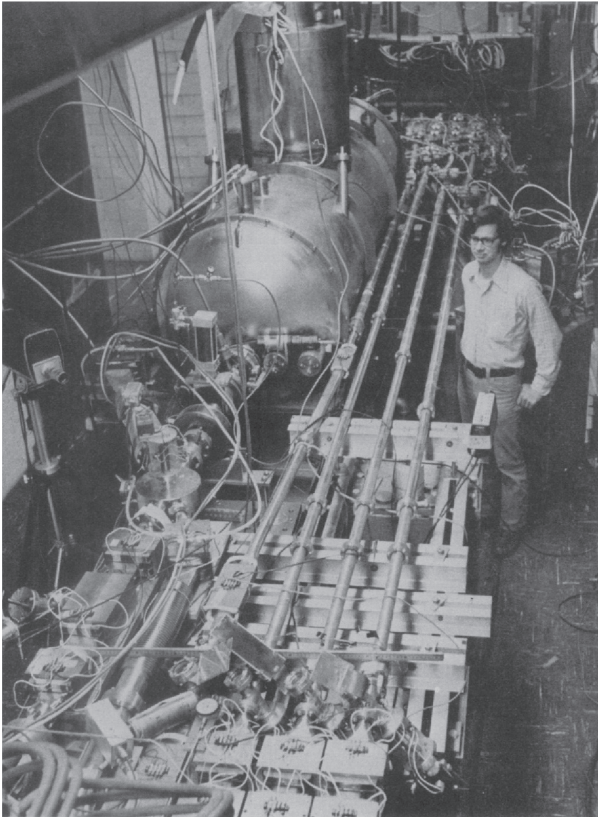


Рис. 4. Шестиоборотный рейс-трековый микротрон США (из [41])

звolyет вместе с криогенной установкой снизить потребляемую мощность по сравнению с обычным ускорителем. Через несколько лет ускоритель модернизировался; энергия ускорения частиц повысилась до 79 МэВ, после чего установка проработала несколько лет, где основной областью применения были эксперименты в ядерной физике.

В 2001 г. был запущен 14-оборотный рейс-трековый микротрон (см. рис. 4), разработанный в НИИЯФ МГУ (Москва) [42]. Максимальная энергия при выводе пучка составила ≈ 70 МэВ, ток электронного пучка в импульсе — 4 мА, частота повторения импульсов $\sim 2,9$ МГц, длительность импульса — 2–20 мкс, импульсная мощность питающего клистрона — 6 МВт. В этом микротроне электроны инжектируются с катода пушки и ускоряются в ЛУЭ, затем попадают в устройства с поворотными магнитами, после чего возвращаются в ускоряющую область. В данной установке была улучшена схема фоку-

сировки частиц: вместо аксиально-симметричной впервые применена призматическая бипериодическая ускоряющая структура (ПБУС), что позволило снизить рассеяние электронов с первой орбиты. Основными применениями микротрона являются: генерация электромагнитного излучения, наработка радиоактивных изотопов. Внешний вид микротрона показан на рис. 5.

Стремление уменьшить площадь электронной орбиты и габаритов ускорителя привело к идее ЭУР в виде двухпроходного рефлексотрона [44], в кото-



Рис. 5. 14-оборотный рейс-трековый микротрон МГУ (из [43])

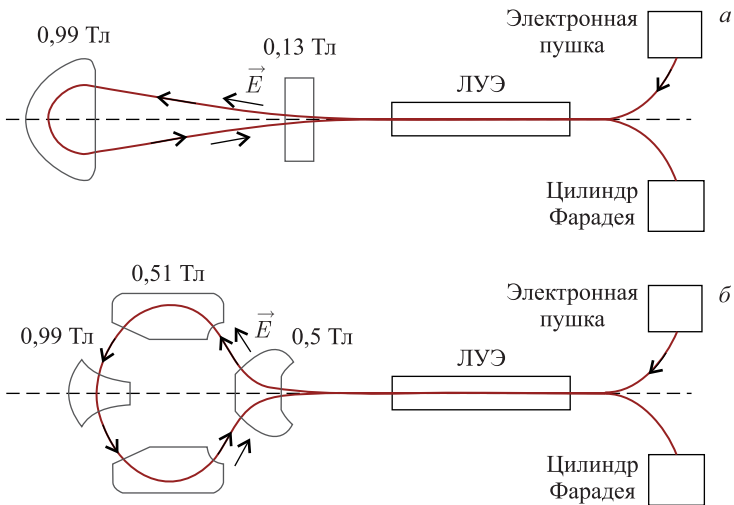


Рис. 6. Схемы ускорения в рефлексотроне (по [44]): а) с двумя магнитами; б) с четырьмя магнитами

ром траектория электронов проходит вдоль ЛУЭ, на выходе из него попадает в поворотный магнит-отражатель, а затем снова входит в ЛУЭ в обратном направлении. Были опробованы две отражающие магнитные системы (рис. 6). В итоге в ЛУЭ, рассчитанном на энергию 8 МэВ, удалось поднять энергию до 16 МэВ после второго прохода.

Отметим две важные новые особенности, появившиеся в схеме ускорения рефлексотрона, которые впоследствии оказались весьма плодотворными для ЭУРНО:

— электроны можно повторно вводить в участок ускорения не только с одной и той же для каждого оборота стороны, что обычно реализуется во всех микротронах, но и с разных сторон (например, в рефлексотроне для четных проходов — с одной стороны, а для нечетных — с другой);

— режим работы рефлексотрона осуществляется на $(2k + 1)\pi$ -моду.

Для полноты исторической картины здесь полезно упомянуть и наиболее известные ЭУР на высокие энергии: установку CEBAF и проект SALO.

Ускоритель CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) находится в Национальной ускорительной лаборатории им. Т. Джефферсона в США (рис. 7) [45]. Он построен по схеме рейс-трека, запущен в 1997 г. (6 ГэВ) и модернизирован в 2013 г. (12 ГэВ).

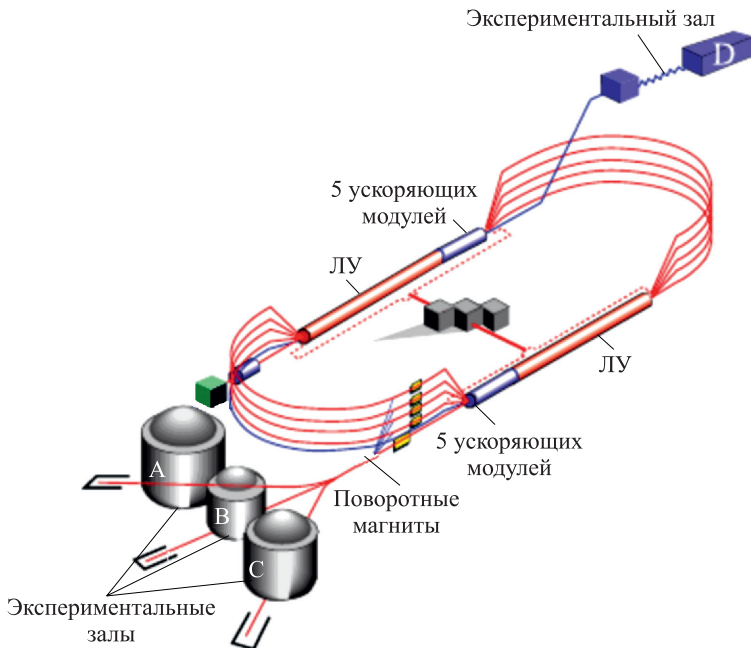


Рис. 7. Схема ускорения установки CEBAF (по [45])

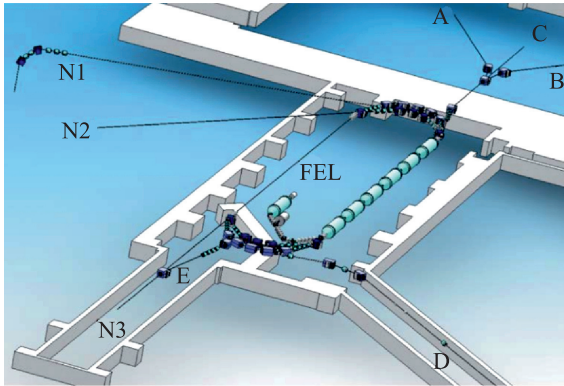


Рис. 8. Схема комплекса SALO (по [46])

Советская ускорительная школа в области ЭУР высоких энергий представлена проектом SALO (ХФТИ, Украина), в котором непрерывный электронный пучок должен достигать энергии до 740 МэВ [46, 47]. Схема ускорителя проекта SALO показана на рис. 8. Электронный пучок, достигнув предполагаемой энергии при трехкратном прохождении ускоряющей структуры, с помощью магнитов отправляется в один из каналов вывода пучка (А, В, С). После двукратного прохождения пучок может быть отправлен в канал D или в канал E. При однократном прохождении электронный пучок направляется по каналам N1, N2.

Кроме того, родственными к ЭУР можно отнести так называемые линейные ускорители с рекуперацией энергии (energy recovery linac). Примером ускорителя-рекуператора может служить проект, развивавшийся в ОИЯИ в начале 1990-х гг. В рамках проекта был разработан комбинированный тип ускорителя-рециркулятора на основе линейного индукционного ускорителя [48].

Изложенные здесь история и логика развития ЦЭУ и ЭУР с их основными вехами — бетатроном, классическим (круговым) и разрезным микротронами, а также рефлексотроном — явились научно-техническими предпосылками создания ускорителей нового класса — ЭУРНО.

2. СХЕМЫ УСКОРЕНИЯ В ЭУРНО

2.1. Схема ускорения в родотроне с траекторией электронов в форме «цветка розы». Идею первого ЭУРНО оформили сотрудники французского Комиссариата по атомной энергии (СЕА) Анник Нгуен (Annick N'Guyen) и Жак Потье (Jacques Pottier) во французском патенте [49] с приоритетом

от 26 мая 1987 г. Позже был взят и патент США [50]. Авторы патентов предложили использовать полуволновой резонатор на основе замкнутой коаксиальной линии для ускорения частиц. Как известно, в простейшем случае внешний СВЧ-генератор возбуждает в таком резонаторе ТЕМ-моду, в которой быстропеременное электрическое поле имеет радиальное направление.

Схема ускорения в этом ЭУРНО, согласно [49, 50], такова (рис. 9). Предварительно промодулированный электронный пучок, генерируемый в обычной термоэлектронной пушке, инжектируется в резонатор радиально. Тогда электроны пучка, попавшие в ускоряющую фазу электрического поля, достигают внутреннего электрода резонатора с увеличенной энергией, а затем через специальное отверстие попадают в эквипотенциальную полость внутри внутреннего электрода резонатора и проходят сквозь нее без заметного изменения энергии. Далее, пройдя эту полость вдоль диаметра, электроны пучка выходят из нее через другое отверстие и снова попадают в переменное поле резонатора. За время прохождения электронов сквозь эквипотенциальную полость направление радиального электрического поля успевает измениться на противоположное, и поэтому электроны снова ускоряются и выходят из резонатора с еще большей энергией. После этого ускоренные электроны отражаются поворотным магнитом и снова вводятся в резонатор в ускоряющей фазе электрического поля. Такой ввод электронов в резонатор и выход из него осуществляются многократно, причем для последовательного ускорения необходим режим четной $2k\pi$ -моды. В результате траектория электронов представляет собой замкнутую линию с самопересечениями на оси резонатора (см. рис. 9) и напоминает по рисунку многолепестковый цветок.

Помимо патентов [49, 50], идея этого ЭУРНО была опубликована в статье [24], в которой Поттье назвал свой ЭУРНО родотроном (из-за сходства траектории электронов с цветком: в древнегреч. *ρῶδον* (rhodon) озна-

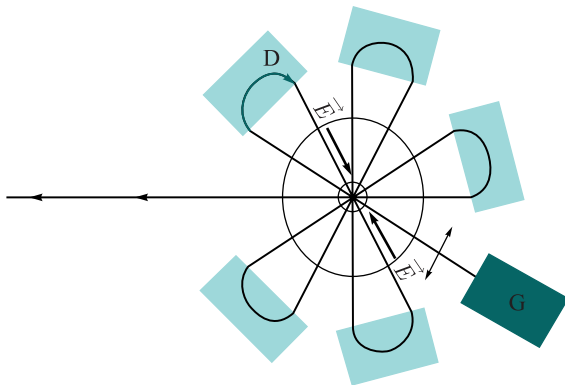


Рис. 9. Схема ускорения в родотроне (по [24])

чает роза). В статье он определил условия синхронизма ускоряемых электронов и поля резонатора, рассчитал нагрузочные характеристики резонатора и выходные параметры ускорителя.

Как видно, схема ускорения электронов в родотроне позволяет сделать ускоритель компактным и при этом использовать только один ускоряющий резонатор. Однако очевидны и трудности, которые могут возникнуть при реализации этой схемы в конкретном устройстве. Они таковы:

— орбита электронов имеет точку самопересечения на оси резонатора, из чего следует необходимость временной развязки проходящих через эту точку различных частей пучка (впрочем, эта проблема исчезает, если длительность электронного сгустка достаточно мала или ток пучка невелик);

— каждый поворотный магнит настраивается, как правило, на конкретную энергию электронов, поэтому вряд ли стоит рассчитывать на неоднократное прохождение орбиты через какой-либо магнит.

Схема ускорения в родотроне, показанная на рис. 8, получила развитие в недавней статье иранских специалистов [51], которые предложили идею и конструкторскую проработку ЭУРНО с двухслойной орбитой электронов в резонаторе (рис. 10). В нем так же, как и в стандартном родотроне, элек-

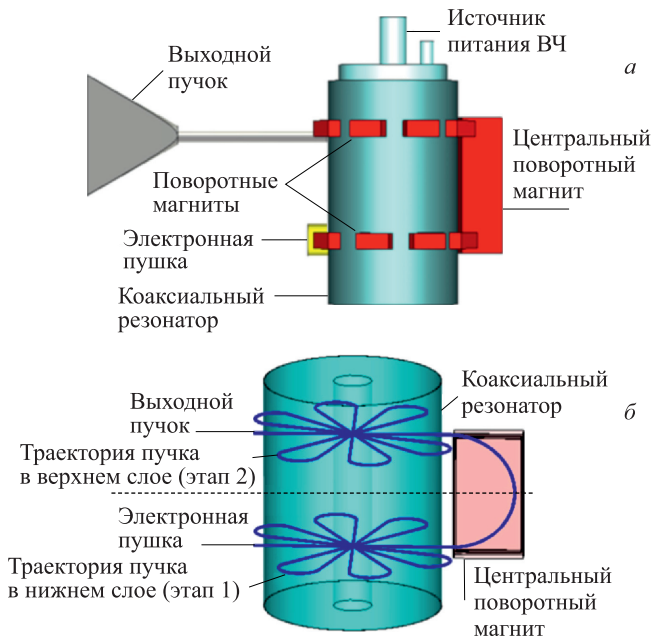


Рис. 10. Схема ускорения электронов в двухслойном родотроне (из [51]): а) конструкция двухслойного родотрона; б) схема двухслойной орбиты

троны движутся в резонаторе в радиальном направлении, проходя путь по многолепестковой орбите, а затем они переводятся в другой слой с помощью центрального поворотного магнита и проходят вдоль многолепестковой орбиты следующего слоя, и т. д.

В таких многослойных ускорителях возможно более эффективное использование объемной энергии ВЧ-поля в резонаторе. Однако следует заметить, что если коаксиальный резонатор двухслойного родотрона возбуждать на основном типе колебаний, то электронная орбита, по крайней мере, одного слоя не будет лежать в плоскости максимума ускоряющего поля. Для того чтобы оба слоя орбиты проходили через максимумы поля, необходимо использовать обертоны резонатора. В частности, в [51] предполагается использовать резонатор, длина которого равна длине волны.

2.2. Схема ускорения в риджтроне с траекторией электронов в форме «рыбьего хребта». Еще одна интересная схема ускорения в ЭУРНО — риджтрон — была предложена и реализована в Японии [52]. Схема ускорения риджтрона выглядит следующим образом (рис. 11). Цилиндрический резонатор, внутри которого размещены два полых хребтообразных электрода

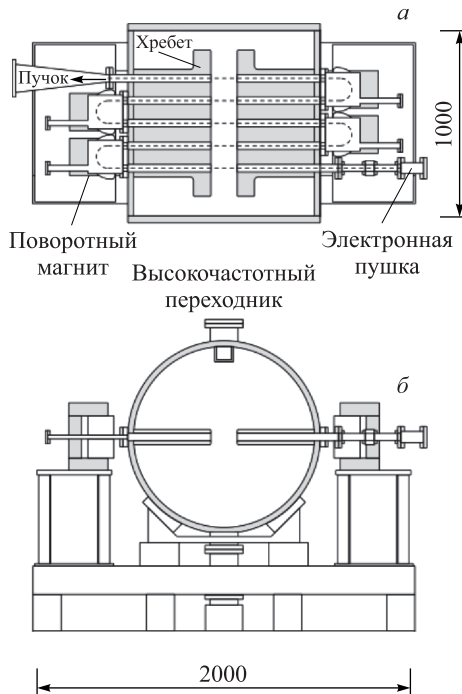


Рис. 11. Схема ускорения электронов в риджтроне (из [53]): а) вид сверху; б) вид с торца

(отсюда происходит название риджтрона), возбуждается на TE_{110} -моду. ВЧ электрическое поле в резонаторе концентрируется в зазоре между хребтами. Предварительно промодулированный электронный пучок инжектируется в полость одного из электродов, проходит его и попадает в зазор в ускоряющей фазе электрического поля. Пройдя через него, электроны приобретают энергию, попадают в полость другого электрода и выходят из резонатора. Затем пучок возвращается в резонатор поворотным магнитом и снова входит в полость электрода с небольшим смещением вдоль оси резонатора (аналогично тому, как это происходит в многослойном родотроне при переходе между слоями). Пройдя эту полость, пучок снова попадает в зазор в направлении, противоположном направлению предыдущего прохода. Таким образом, для ускорения в риджтроне должен быть реализован режим работы на $(2k + 1)\pi$ -моду так же, как и в рассмотренном выше рефлексо-троне.

В итоге электронная орбита в риджтроне примет вид зигзагообразной линии. Она не имеет самопересечений таких, как в родотроне. Но в схеме ускорения риджтрона имеется тот же недостаток, который мы уже отмечали для двухслойного родотрона: если его резонатор возбуждать на основном типе колебаний, то электронная орбита некоторых слоев не будет лежать в плоскости максимума ускоряющего поля, что несколько снижает темп ускорения.

2.3. Схема ускорения в фентроне с траекторией электронов в форме «крыльчатки вентилятора». Схема ускорения ЭУРНО типа «фентрона» предложена корейскими специалистами [54]. Она представлена на рис. 12. В фентроне движение электронов происходит в двух цилиндрических резонаторах в аксиальном направлении, при этом резонаторы возбуждаются на TM_{010} -моду.

В итоге орбита электронов будет иметь вид цилиндрической крыльчатки вентилятора (фена), что, по-видимому, и дало название фентрону. Схема

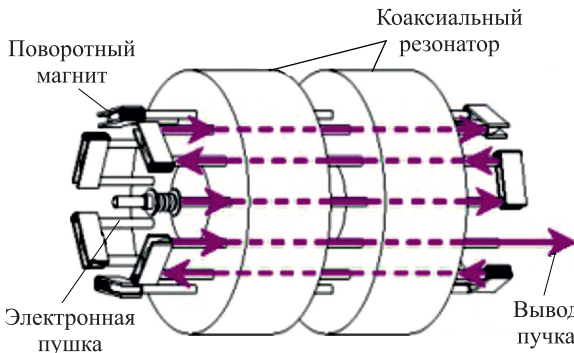


Рис. 12. Схема ускорения электронов в фентроне (из [54])

ускорения в фентроне представляет собой развитие схемы ускорения рефлексотрона.

2.4. Схема ускорения в цилиндротроне. Цилиндротрон — предложенный китайскими специалистами ЭУРНО, который содержит четыре связанных между собой резонатора [55]. Схема ускорения электронов в цилиндротроне показана на рис. 13, и по сути цилиндротрон представляет собой разновидность разрезного микротрона типа бициклотрона (или тетрациклотрона). Согласно схеме, электроны последовательно проходят каждый резонатор и поворотные магниты. При этом на выходах из резонаторов устанавливаются электростатические устройства отклонения, которые заставляют электроны закручиваться по спирали и переходить в другую плоскость. Этим достигается отсутствие самопересечения орбиты.

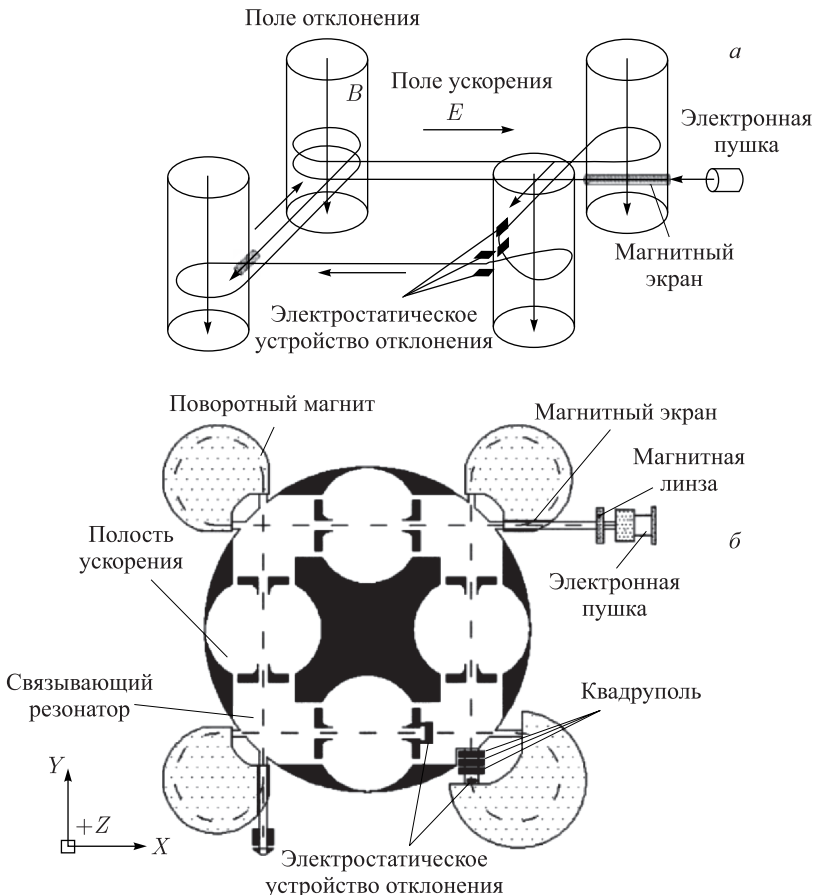


Рис. 13. Схема ускорения в цилиндротроне (из [55]): а) общая схема; б) вид сверху

3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭУРНО

3.1. Электронные пушки. Электронные пушки, которые используются в ЭУРНО, представляют собой термоэмиссионные устройства, которые традиционно применяются в ЛЭУ или приборах вакуумной СВЧ-электроники. Например, в первом действующем родотроне [56] была установлена пушка от стандартной ЛБВ, дающая электронный пучок с током менее 1 мА и энергией электронов 6 кэВ. В этом родотроне с помощью простейшего модулятора в резонатор могли инжектироваться импульсные электронные пучки с длительностью от 1 до 20 мкс, которые следуют с частотой от 100 до 1000 Гц.

Впоследствии в родотронах стали использоваться более сильноточные пушки. Так, в родотроне [57] источником электронов была пушка с электронным током 150 мА при энергии электронов 50 кэВ, а в самом мощном родотроне ТТ1000 [58] — пушка с характеристиками 1 А и 60 кэВ соответственно. Там же, в [57, 58], была рекомендована длительность импульса тока, соответствующая 60° от периода ВЧ-поля.

В риджтроне [53] также была применена термоэмиссионная электронная пушка на основе монокристалла LaB_6 , дающая импульсы электронного тока 20 мА при энергии электронов 20 кэВ.

3.2. Ускоряющие резонаторы. Форма ускоряющего резонатора ЭУРНО зависит от схемы ускорения, а размеры — от рабочей частоты. Так, в родотроне резонатор имеет форму цилиндрического коаксиала с короткозамкнутыми торцами и обычно обладает метровыми размерами.

Важной характеристикой резонатора является добротность для необходимой моды колебаний. На величину добротности влияет качество изготовления резонатора и, в особенности, состояние внутренней стенки. В родотронах, как правило, резонатор изготавливается из нержавеющей стали, а его внутренняя

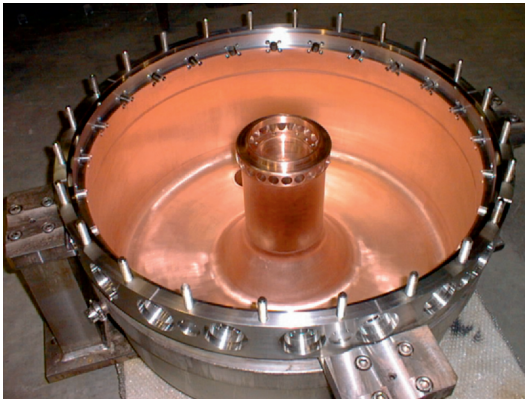


Рис. 14. Внутренняя стенка резонатора родотрона (из [59])

стенка покрывается бескислородной медью. На рис. 14 показан внутренний вид резонатора одного из родотронов.

Измерено, например, что резонатор диаметром и длиной ~ 2 м родотрона [57] имеет добротность 40200 (расчетно-теоретическое значение добротности 55000), добротность резонатора диаметром 966 мм и длиной 990 мм риджтрона — 21000 (измеренная) и 27000 (рассчитанная) [53] (здесь сказывается наличие хребтообразных электродов), а расчетная добротность резонаторов диаметром 2,5 м и длиной 1,8 м цилиндротрона — 57333 [55].

В фентроне, имеющем два резонатора, схема ускорения позволяет существенно упростить и удешевить процесс изготовления резонатора, так как TM_{010} -мода колебаний допускает продольные (вдоль электрического поля) разрезы и швы в стенках резонаторов без заметного снижения добротности.

В [54] рассматривались два варианта резонаторов фентрона, круглый и девятигранный (рис. 15). Расчеты показали, что на частоте 159,5 МГц добротности резонатора для этих двух резонаторов различаются несильно: 51720 и

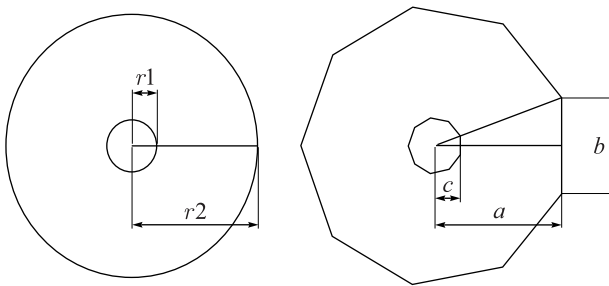


Рис. 15. Две формы резонаторов фентрона (из [54])

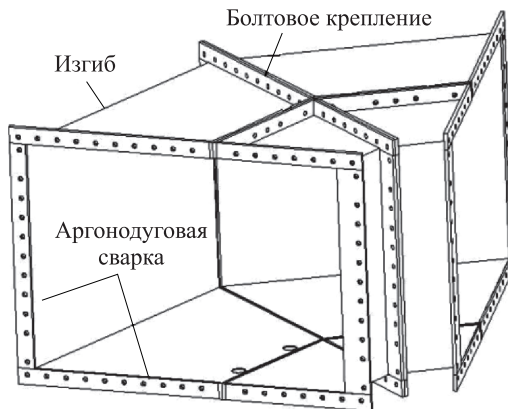


Рис. 16. Технология сборки резонаторов фентрона (из [54])

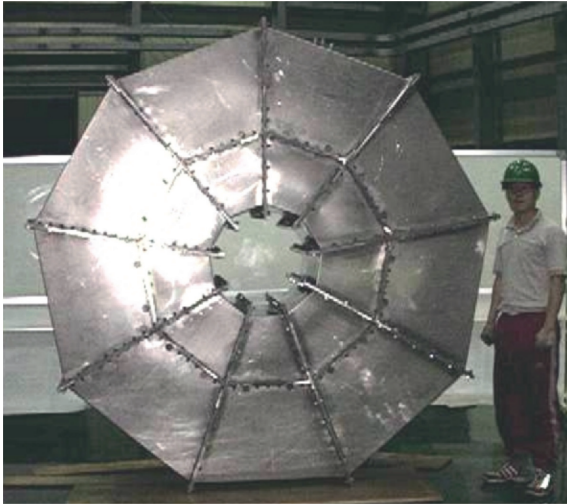


Рис. 17. Внешний вид резонатора ферритона (из [54])

51504 соответственно. Это позволило использовать изгибы, болтовое соединение и сварку при сборке резонаторов ферритона (рис. 16, 17).

3.3. Поворотные магниты. Вышедшие из ускоряющего резонатора электроны пучка в ЭУРНО направляют снова в резонатор при помощи поворотных магнитов. Несмотря на то, что схемы ускорения в рассмотренных ЭУРНО — родотроне, ферритоне, риджтроне и цилиндротроне — отличаются друг от друга кардинальным образом, конструкции их поворотных магнитов могут быть практически аналогичными конструкциям поворотных магнитов для разрезных микротронов. В ЭУРНО магниты также выполняют две основные функции: разворота пучка и его фокусировки.

В родотронах, как правило, реализуются 10 проходов пучка через ускоряющий резонатор, для чего устанавливаются девять поворотных магнитов (рис. 18) [57, 60]. Как можно заметить из рис. 18, все поворотные магниты, кроме первого, имеют почти одинаковую конструкцию и размеры, так как во время первого прохода электроны имеют низкую энергию и здесь нужен особый магнит. Для точной настройки фазы между пучком заряженных частиц и ускоряющим полем, а также для точного направления пучка в отверстие в резонаторе в родотронах используют радиальную регулировку положения поворотных магнитов.

Аналогично, в риджтроне используется пятипроходная схема ускорения, и для него необходимо четыре поворотных магнита [52, 53], а в ферритоне устанавливаются 16 поворотных магнитов [54]. В иранском двухслойном ро-



Рис. 18. Сборка магнитов родотрона (из [59])

дотроне [51] рассматривалось три варианта схемы ускорения с общим числом поворотных магнитов — 16, 20 или 24, причем один из них — центральный, переводящий пучок из одного слоя в другой, имел большие размеры и меньшую магнитную индукцию по сравнению с поворотными магнитами в слоях.

Следует отметить, что в риджтроне и фентроне траектории пучков на входе в магнит и на его выходе всегда параллельны, в то время как в 10-проходных родотронах [57, 58] угол между участками траекторий на входе и на выходе магнита составляет 9° . В двухслойном родотроне [51] траектории на входе и выходе поворотных магнитов в слоях сходятся к оси резонатора под углом 15, 18 или $22,5^\circ$, а в центральном поворотном магните они параллельны.

С помощью специальных магнитостатических расчетов определяются размеры поворотных магнитов и величина магнитной индукции. Основное требование расчетов заключается в необходимости получения постоянного магнитного поля вдоль орбиты электронов.

При разработке первых моделей родотронов сначала рассматривались классические полюсные магниты (pole magnets) — магниты, обмотки которых окружены железом более чем с двух сторон. Но разработчики столкнулись с чрезмерной кривизной контура эффективного поля вблизи радиального края полюса на траектории пучка. Это неправильно с точки зрения геометрических условий, так как необходимые силовые линии должны быть одинаковыми во всех плоскостях (от медианной плоскости до полюсной поверхности).

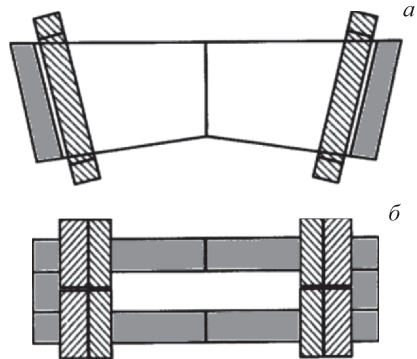


Рис. 19. Схема рамочного магнита родотрона (обмотки заштрихованы, сердечник закрашен): *а*) вид изнутри; *б*) вид с торца (согласно [61])

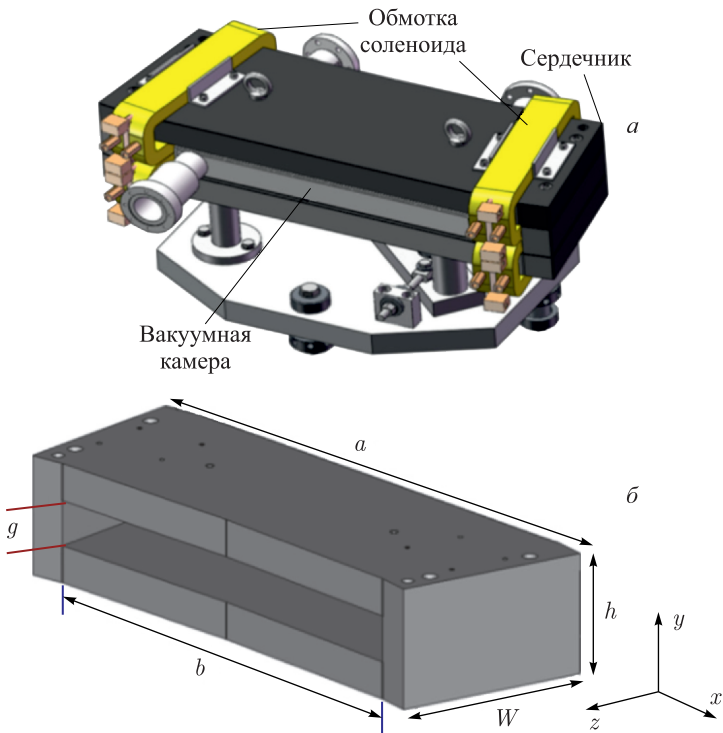


Рис. 20. Поворотный магнит в слоях двухслойного родотрона [51]: *а*) схема; *б*) сердечник поворотного магнита

Для решения этой проблемы был предложен рамочный вариант поворотного магнита (window-frame magnet), в котором обмотка соленоида разделена на две симметричные части (рис. 19) [61]. Такой поворотный магнит удовлетворяет всем геометрическим требованиям и обеспечивает симметричное

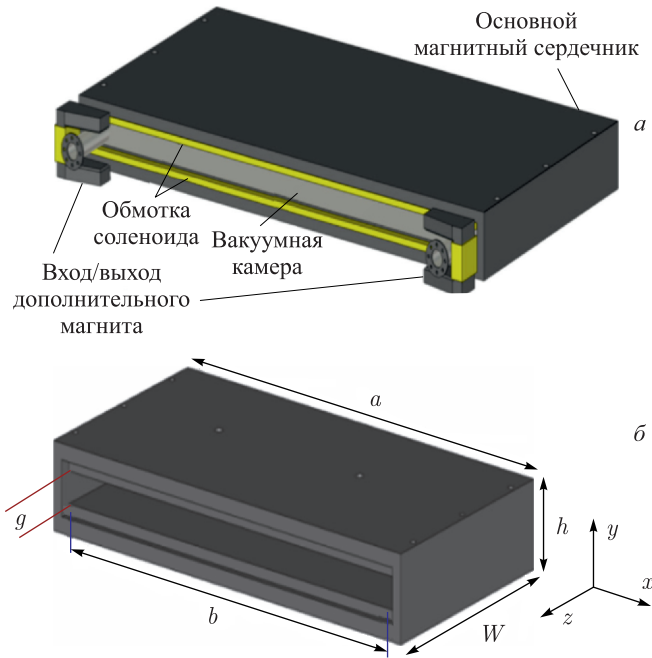


Рис. 21. Центральный поворотный магнит двухслойного родотрона [51]: а) схема; б) сердечник поворотного магнита

распределение поля. Впоследствии подобные рамочные магниты с боковыми обмотками (out-of-plane coils) стали часто применяться и в других ЭУРНО. Например, на рис. 20 и 21 показаны конструкции поворотных магнитов двухслойного родотрона из работы [51], одного из поворотных магнитов в слоях и центрального поворотного магнита соответственно. Они создают магнитное поле с индукцией 958,4 и 603 Гс.

Отметим, что при использовании предложенных рамочных магнитов возникает поперечная дефокусировка пучка, точно такая же, как и наблюдавшаяся в первых вариантах разрезных микротронов. В двухслойном родотроне эта проблема может быть решена абсолютно так же, как и в микротронах: согласно [40] здесь могут быть использованы два дополнительных магнита при входе и выходе из центрального поворотного магнита с инвертированным по направлению магнитным полем (см. рис. 21, а).

Аналогичная по действию магнитная система была разработана и для риджтрона, но с использованием подковообразного магнита. На рис. 22 показана схема отражения пучка в поворотном магните риджтрона [52]. Согласно

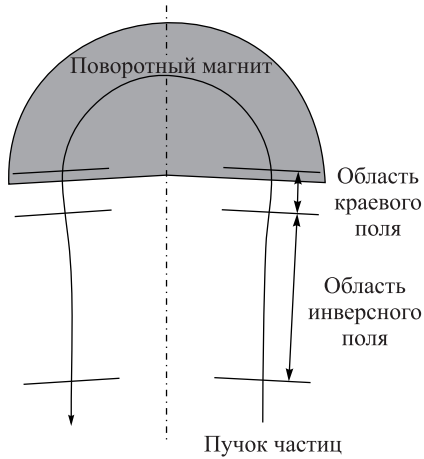


Рис. 22. Схема отражения пучка в поворотном магните риджтрона (по [52])

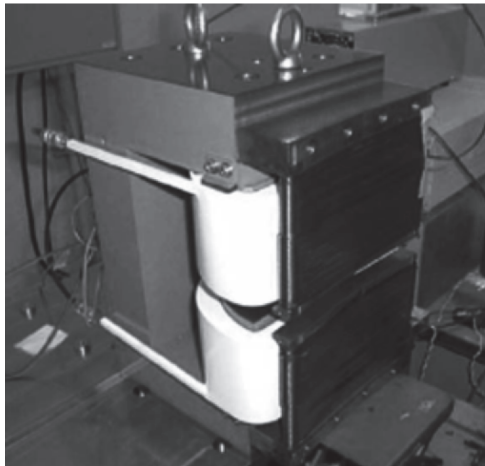


Рис. 23. Внешний вид подковообразного магнита риджтрона (из [25])

ей, поворотный подковообразный магнит состоит из скобы и дополнительной катушки для возбуждения обратного поля. Внешний вид подковообразного магнита риджтрона показан на рис. 23.

Ускоритель фентрон использует 16 поворотных магнитов (рис. 24), каждый из которых состоит из основного рамочного типа и дополнительного магнита для обеспечения поперечной фокусировки. Магнитная индукция основного магнита — 36,1 Гс, а дополнительного магнита — 21,5 Гс [62].

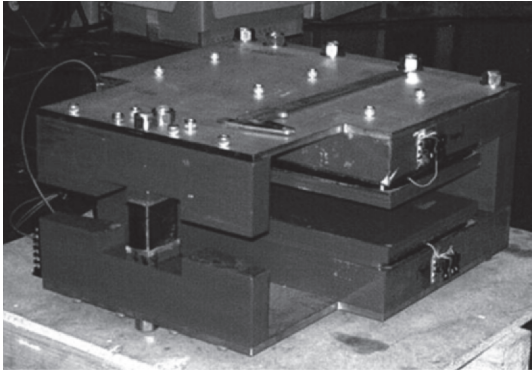


Рис. 24. Поворотный магнит фентрона (из [62])

Современные методы расчета и изготовления магнитных систем позволяют создавать магнитные поля с точностью 1–3%. В итоге создание основных элементов ЭУРНО — поворотных магнитов — является достаточно освоенной технологией.

4. РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭУРНО

Создание таких сложных установок, как ЭУ, всегда сопровождается комплексом всесторонних расчетов и моделирования. В научно-технической литературе, посвященной разработке и созданию ЭУРНО, имеется большое количество материалов, в которых приводятся результаты расчетов распределения электромагнитного поля в ускоряющих резонаторах, распределения магнитного поля в поворотных магнитах, динамики электронных пучков и т. д.

Поскольку магнитостатические и электромагнитные расчеты в основном стандартны, здесь мы кратко остановимся только на результатах расчетов динамики пучков, приведя лишь несколько примеров.

На рис. 25 представлены результаты траекторных расчетов электронного пучка в родотроне из [63], в которых были учтены пространственный заряд пучка и потери электронов на стенках резонатора при непрерывной инжекции электронов с энергией 8 кэВ и начальным эмиттансом $50 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. На рис. 25 видно, как изменяется внешний вид пучка с учетом влияния пространственного заряда и потерь частиц во время ускорения. Фокусировка заряженных частиц в резонаторе происходит в определенных точках после прохождения рядом с поворотным магнитом. Чтобы получить конечную энергию 20 МэВ, пучок заряженных частиц должен совершить 10 проходов, так как энергия

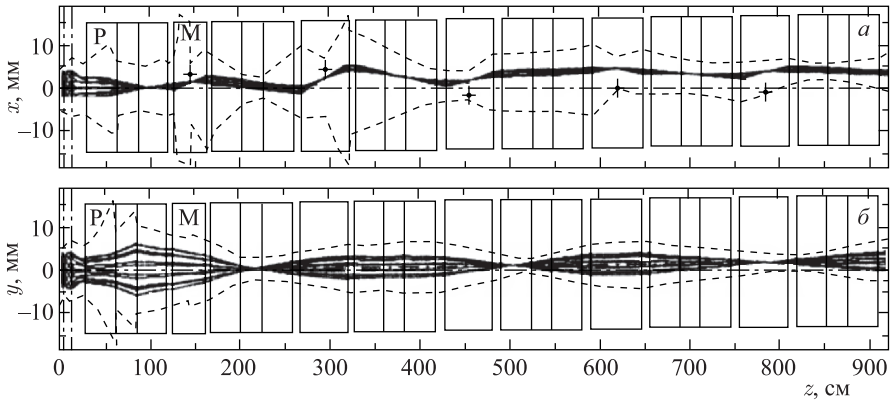


Рис. 25. Расчетные траектории электронов в родотроне в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскости (Р — резонатор, М — магнит) [63]

за один проход ограничивается примерно 2 МэВ. За время проходов практически не происходит потери частиц. В итоге вычисленный конечный ток пучка заряженных частиц составил 11 мА, а окончательный горизонтальный эмиттанс получился менее 10 мм·мрад при энергетическом разбросе ~ 100 кэВ.

Аналогичные траекторные расчеты были проведены и для риджтрона с подковообразными магнитами [53]. На рис. 26 показаны расчетные огибающие электронного пучка в риджтроне, на которых заметно различие между вертикальной и горизонтальной фокусировками (ось риджтрона считалась горизонтальной).

В [55] теоретически изучалась динамика электронов в цилиндротроне. На рис. 27 представлена полученная там кривая набора энергии электронами после последовательного прохождения резонаторов, а на рис. 28 —

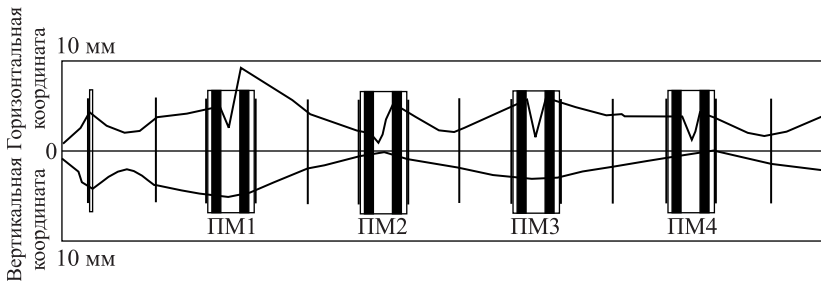


Рис. 26. Расчетные огибающие пучка в риджтроне (ПМ — поворотный магнит) [49]

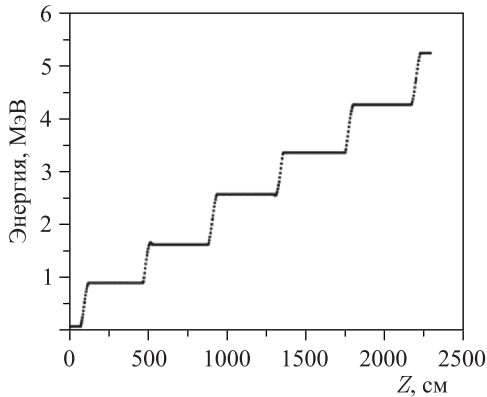


Рис. 27. График набора энергии электронами в цилиндротроне [55]

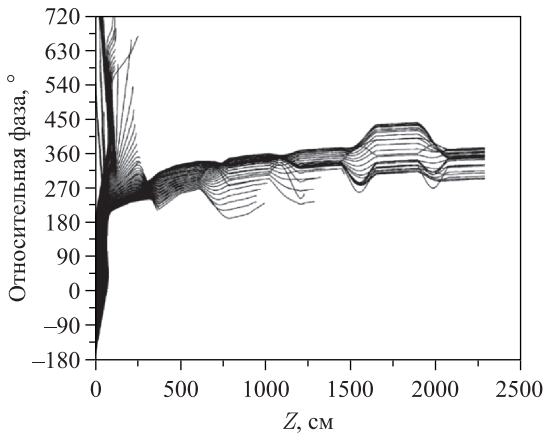


Рис. 28. Относительная фазовая сходимость электронов в цилиндротроне [41]

динамика продольной фазировки электронов, свидетельствующая о действии в ЭУРНО некоторой разновидности принципа автофазировки в резонаторах.

5. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЭУРНО И ИХ ПАРАМЕТРЫ

5.1. Родотроны серии ТТ. Начальные оценки, сделанные в [24], дали примерные параметры прототипа первого родотрона: частота — 180 МГц, мощность ВЧ-генератора — 70 кВт, число лепестков орбиты — 6, внутрен-

ний радиус коаксиального резонатора — 0,1125 м, его внешний радиус — 0,45 м, длина резонатора — 0,916 м, диаметр всей установки — 1,8 м, ее высота — 2,1 м, энергия пучка на выходе — 3,3 МэВ, мощность пучка — 20 кВт.

Первый родотрон с энергией 3,5 МэВ и мощностью в 20 кВт был построен в 1990 г. в СЕА (Saclay) [56]. Параметры ускорителя оказались близки параметрам прототипа [24]. Внешний вид родотрона, свидетельствующий о его компактности, показан на рис. 29, а спектр его тормозного излучения, подтверждающий выходную энергию электронов, — на рис. 30.

В 1991 г. бельгийская компания Ion Beam Application (IBA) подписала соглашение с СЕА о последующих разработках промышленных ускорителей, и в 1993 г. IBA совместно с СЕА опубликовала результаты разработки ускорителя Rhodotron 10/5 [57,61]. Позже его стали обозначать Rhodotron

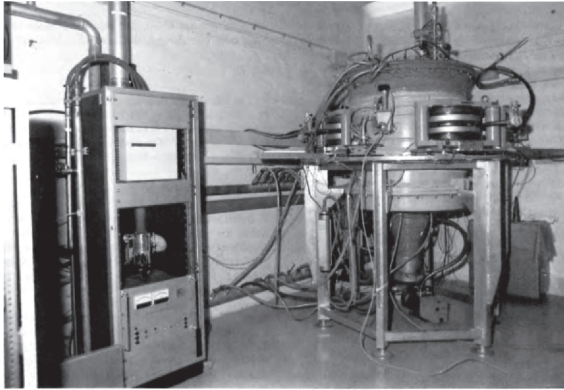


Рис. 29. Первый родотрон (из [56])

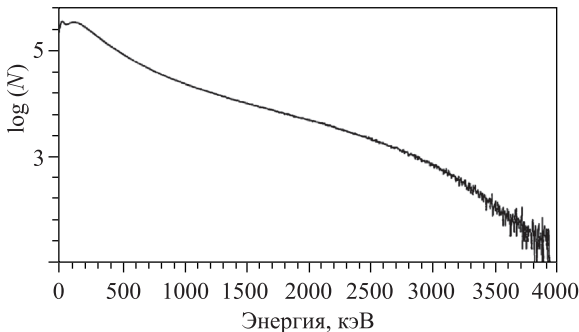


Рис. 30. Спектр тормозного излучения первого родотрона (из [56])

ТТ200 [60]. Он имел следующие выходные параметры: рабочая частота — 107,5 МГц, энергия электронов — 10 МэВ, мощность пучка — 100 кВт, число проходов электронов через резонатор — 10. Имелась возможность вывода пучка с энергией 5 МэВ после пяти проходов.

Разработка оказалась очень удачной. После этого в течение всего 10 лет в ИВА была разработана целая линейка родотронов серии ТТ (табл. 1). Изделиям придали товарный вид (рис. 31), их стали выпускать серийно и поставлять заинтересованным организациям.

Таблица 1. Характеристики моделей родотрона серии ТТ

Параметр, единица измерения	Модель ускорителя			
	ТТ100	ТТ200	ТТ300	ТТ1000
Рабочая частота, МГц	215	107,5	107,5	107,5
Сила тока, мА	3,5	10	20	100
Набор энергии за один проход резонатора, кэВ	833	1000	1000	1200
Выходная энергия электронов, МэВ	1–10	1–10	1–10	5–7
Количество проходов	12	10	10	6
Количество поворотных магнитов	9	9	9	5
Средняя мощность пучка, кВт	50	100	200	700
Внешний диаметр резонатора, м	0,9	0,9	0,9	2
Высота ускорителя, м	1,75	3	3	3,3
Добротность резонатора	30000	40200	~ 40000	?



Рис. 31. Серийный родотрон серии ТТ (из [64])

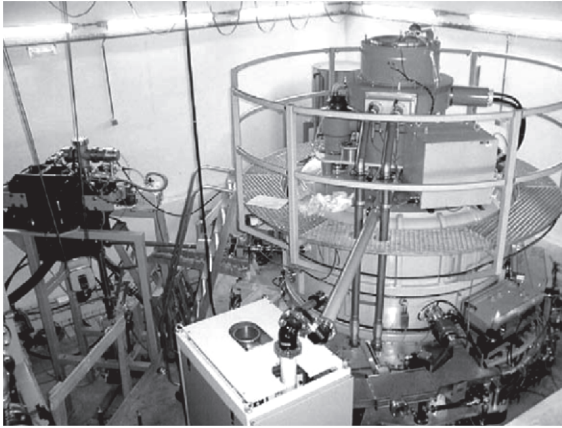


Рис. 32. Родотрон ТТ1000 (из [58])

Сейчас фирма ИВА поставляет родотроны потребителям всего мира. К 2015 г. фирмой было продано более 36 ускорителей [65]. Родотроны серии ТТ были поставлены в организации Австрии [66], Германии [67], Ирана [68], Испании [69], Италии [70], Швейцарии [71] и др. В основном эти родотроны используются для облучательных и радиационных работ.

Самый мощный родотрон этой серии по данным из [58] — родотрон ТТ1000. Он содержит коаксиальный резонатор диаметром 2 м, ВЧ-систему возбуждения резонатора на основе цепочки ламповых усилителей, рассчитанную на мощность до 1000 кВт, электронную пушку с параметрами 60 кэВ, 1 А пикового тока и 100 мА среднего тока электронного пучка, пять поворотных магнитов, систему вывода электронного пучка и стандартные системы технологического обеспечения работы ускорителя (вакуумную систему, систему управления, систему сканирования на выходе электронного пучка и т. п.). Внешний вид родотрона ТТ1000 показан на рис. 32.

Недавно ИВА анонсировала выпуск в серию в самом ближайшем будущем очень компактного родотрона ТТ50 с током электронного пучка 1 мА и его средней мощностью 10 кВт [65].

5.2. Действующий образец риджтрона. Риджтрон был разработан в Токийском институте технологии и создан при участии фирмы Toshiba Co. [25, 52, 53]. Он имеет следующие выходные характеристики: частоту — 92,8 МГц, энергию электронов на выходе из электронной пушки — 20 кэВ, энергию электронов на выходе из ускорителя — 1,9 МэВ, среднюю мощность пучка — 5,3 кВт. На рис. 33 представлен измеренный энергетический спектр электронов на выходе из ускорителя, на рис. 34 по-

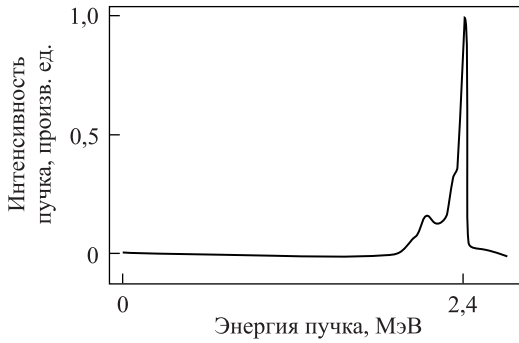


Рис. 33. Энергетический спектр электронов на выходе риджтрона (из [53])

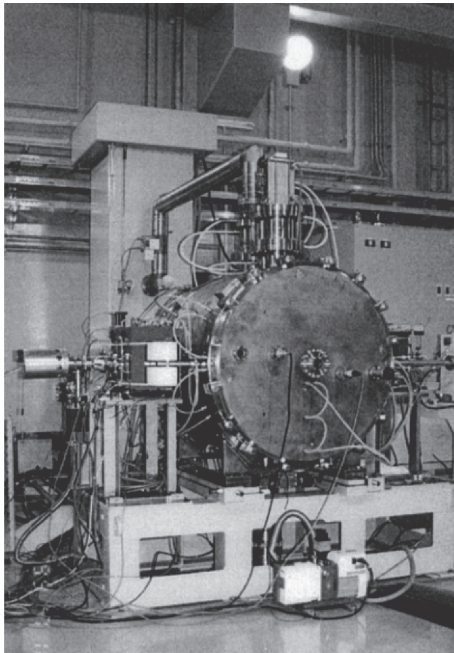


Рис. 34. Риджтрон (из [53])

казан внешний вид риджтрона, а на рис.35 — внутренний вид резонатора.

5.3. Действующий образец фентрона. Фентрон «Fantron-I» был разработан и создан в Сеульском национальном университете. Он показал следующие

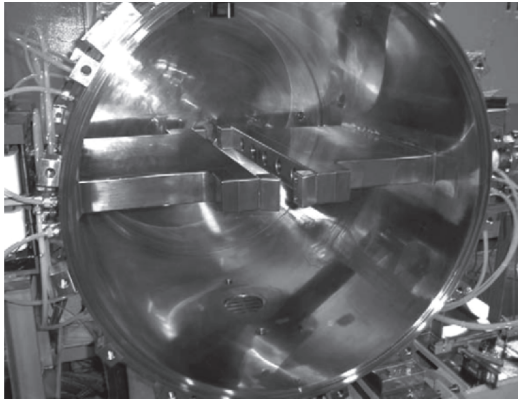


Рис. 35. Система электродов ускорителя внутри резонатора

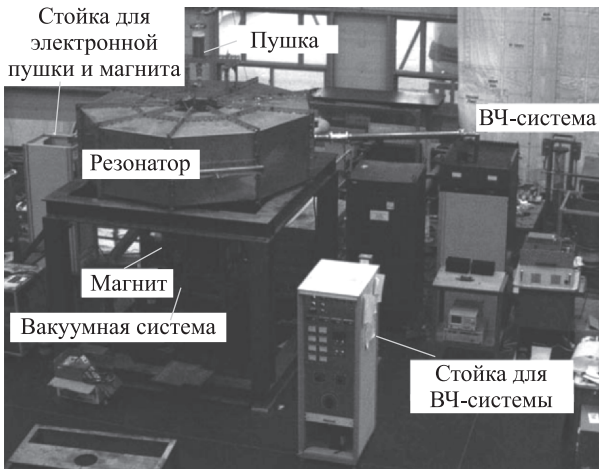


Рис. 36. Фентрон с девятигранными резонаторами (из [62])

щие характеристики: частоту — 159,31 МГц, энергию электронов на выходе 10 МэВ, среднюю мощность пучка — 100 кВт. Его внешний вид представлен на рис. 36.

6. ПРИМЕРЫ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭУРНО

6.1. Применения в технологиях материалов. ЭУРНО оказались очень удобным инструментом в радиационных технологиях материалов. Наибольшее распространение среди всех видов ЭУРНО получили родотроны (не-

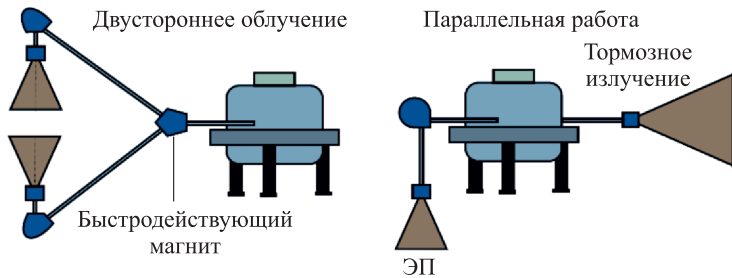


Рис. 37. Возможные схемы проведения радиационных работ на родотроне (из [72])

сколько десятков установок). Поскольку риджтрон и фентрон были изготовлены в единственном экземпляре, а о запуске цилиндротрона сведений не имеется, то ниже представлены только результаты исследований, проведенных на родотронах серии ТТ.

Прежде всего приведем две возможные схемы проведения радиационных работ на родотронах (рис. 37): схема двустороннего облучения крупногабаритных объектов и схема параллельной работы с использованием электронного пучка и тормозного γ -излучения.

Отметим, что сами разработчики родотронов на своем сайте [65] предлагают следующие направления использования родотронов:

- сшивание полимеров;
- вулканизация резины;
- допирование полупроводников;
- стерилизация медицинских приборов;
- рентгеновская обработка пищевых продуктов.

Однако области применения родотронов у пользователей ускорителей оказались гораздо шире.

Так, в работе [73] изучались процессы модификации поверхности тefлона, стекла, полиэтилена и титаната бария сканирующим электронным пучком одного из первых родотронов (энергия электронов — 5 МэВ, ток пучка — 1–16 мА, диаметр пучка — 8 см, частота сканирования — 100 Гц). При дозе облучения 10–200 кГр наблюдалось изменение поверхностного сопротивления образцов, объясняющееся возникновением электрических микрозарядов в приповерхностных слоях образцов.

В статьях [68, 74] представлены результаты исследований влияния кристалличности и электронного облучения пучком родотрона ТТ200 на теплопроводность и теплоемкость низкоплотного полиэтилена при различных значениях процентного содержания этиленвинилацетата и дозы облучения. Обнаружено уменьшение теплопроводности и теплоемкости при увеличении дозы облучения в диапазоне 0–250 кГр.

Технология сшивания этилен-октен полимерных цепочек под действием электронного облучения родотрона ТТ300 при дозах 30–120 кГр рассмотрена в [67], а результаты обработки целлюлозных материалов родотроном ТТ100 — в [66].

В технике широко применяется термопластик типа полибутилентерефталат: например, в электрических соединителях, в защитных коробах сетепроводов, в медицинских приборах и т.д. Он теплоустоек, отталкивает многие жидкости и легко обрабатывается. Но он и легко воспламеняется, что часто приводит к пожарам. Кроме того, продукты его горения оказываются весьма токсичными. Поэтому для уменьшения рисков возникновения нештатных ситуаций в пластик добавляют химические замедлители горения. В [75] исследовалось влияние электронного облучения родотрона ТТ200 в диапазоне доз до 400 кГр на свойства некоторых замедлителей горения термопластика. Было установлено, что после такой обработки замедлителя пластик становится более твердым, а скорость горения уменьшается.

В [76] описаны технологии синтеза иридиевых наночастиц с весьма узким разбросом по размерам. Одна из технологий основана на разложении карбонила иридия на графеновой подложке в ионной жидкости под действием электронного облучения родотрона. Получено, что при облучении образцов электронами с дозой ~ 90 кГр в образцах появляются наночастицы иридия с размерами $(3,6 \pm 1,0)$ нм (рис. 38). Наночастицы предполагается использовать в качестве химического катализатора.

И еще один пример: в [77] производилось электронное облучение цериевых стекол пучком родотрона ТТ300 (доза ~ 25 кГр). Эти стекла широко используются в фармацевтике. Были подобраны такие режимы стерилизационного облучения, которые не влияют на необходимые характеристики материалов.

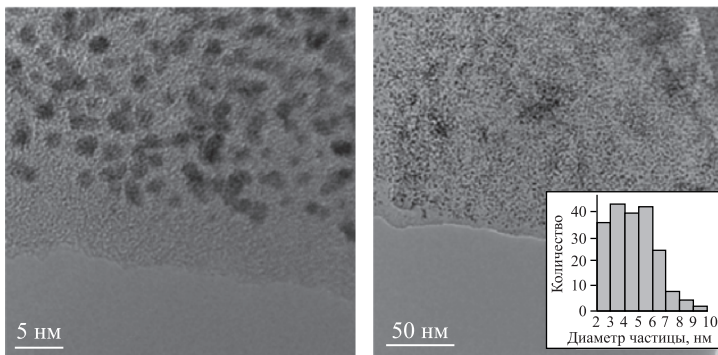


Рис. 38. ТЭМ-изображения наночастиц иридия, полученных при облучении образцов с помощью родотрона (в правом нижнем углу — распределение наночастиц по размерам; из [75])

6.2. Применения в ядерной физике и медицине. Энергия электронов на выходе из родотрона достигает 10 МэВ. Это оказалось очень «удобным» значением энергии для осуществления фотоядерных реакций типа (γ, n) , например, для генерации нейтронов при взаимодействии тормозного излучения с мишенью. В табл. 2 приведен перечень изотопов из [78]*, энергетический порог реакции которых лежит ниже значения 10 МэВ. Там же, в [79], выполнены численные оценки для приведенных в табл. 2 нуклидов, показавшие, что при использовании тормозного излучения родотрона ТТ200 выходы нейтронов могут составлять $10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при энергиях частиц 0,9, 0,4 и 0,9 МэВ для мишеней из свинца, тантала и вольфрама соответственно.

Таблица 2. Характеристики изотопов с порогом реакции (γ, n) ниже 10 МэВ по данным [78]

Изотоп	Пороговый уровень энергии (γ, n) , МэВ	Содержание, %
^{206}Pb	8,09	24,10
^{207}Pb	6,74	22,10
^{208}Pb	7,37	52,40
^{181}Ta	7,58	99,99
^{182}W	8,07	26,30
^{183}W	6,19	14,28
^{184}W	7,41	30,70
^{186}W	7,19	28,60

Большое значение для медицины имеет изотоп ^{99}Mo , который используется как «генератор» короткоживущего изотопа ^{99m}Tc (период полураспада ~ 6 ч). В настоящее время около 70 % диагностических процедур в онкологии и около 50 % диагностических процедур в кардиологии проводится с помощью технеция. Так как период полураспада ^{99}Mo также невелик (66,7 ч), то создавать его запасы невозможно.

Сейчас ^{99}Mo нарабатывают в ядерных реакторах, и его производство очень дорого и экологически небезопасно. В [80] рассмотрено применение электронных ускорителей в «чистых» технологиях получения требуемого изотопа молибдена путем проведения фотоядерных реакций. Из расчетов [81] следует, что на родотроне ТТ200 за одну неделю можно наработать партию препаратов ^{99}Mo с активностью 40 Ки.

*В справочнике [78] приведены иные значения порогов реакций и процентного содержания изотопов, лишь незначительно отличающиеся от [77], что несущественно для рассматриваемых применений.

Следующие два примера иллюстрируют стерилизационные возможности излучений родотрона. Так, в [82] рассмотрено применение родотрона ТТ200 для обработки гидрогелевых покрытий на основе поливинилпирролидона, полиэтиленгликоля и агара для заживления ран. Показано, что при обработке покрытия с дозой до 40 кГр снижается отек тканей вблизи раны и создается противобактериальный барьер. Этот же родотрон использовался в [83] для стерилизации кварцевых медицинских изделий.

6.3. Применения в пищевой и сельскохозяйственной областях. Примеров применения родотронов в качестве облучающих установок для легкой и пищевой промышленности предостаточно. Приведем лишь некоторые из них.

В [69] производилась обработка ягод винограда сорта «Темпранильо» (Tempranillo) излучением родотрона ТТ100 (значения доз — 0,5, 1 и 10 кГр). Исследовалось влияние облучения на популяцию бактерий и дрожжей, выход фенола и качество получаемого из винограда вина. Показано, что такая обработка может быть использована для холодной пастеризации винограда, удаления посторонних дрожжей и бактерий и для улучшения ферментации. Оказалось, что и качество вина после такой обработки возрастает: вино приобретает дополнительный фруктовый аромат и насыщенность.

В [84, 85] родотрон применялся для облучения муки, полученной из семян хлопчатника. Известно, что такая мука используется как хороший источник протеинов в животных кормах, однако она содержит токсичный компонент — госсипол. В [84, 85] было показано, что облучение с дозой до 40 кГр способствует уменьшению содержания госсипола в муке в несколько раз. Аналогичные исследования были проведены с семенами хлебного злака — сорго [86]. Было показано, что после обработки излучением родотрона ТТ200 с дозой до 30 кГр содержание непищевых плохо усваиваемых компонентов, таких как фитат и танин, резко снижается. Тем самым улучшаются питательные свойства семян, которые используются в пищу и на корм животных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный обзор ориентирован на широкий круг читателей, работающих над созданием и использованием радиационных установок для различных областей промышленности. Представленный в нем фактический материал свидетельствует о существовании сравнительно молодой, но уже достаточно развитой в ускорительной технике области — техники ЭУРНО. Работающие по оригинальным схемам ускорения, компактные и надежные ЭУРНО типа родотрона уже распространены по всему миру, активно используются в реальных радиационных технологиях на благо человека. Другие ЭУРНО типа фентрона, риджтрона и цилиндротрона находятся на различных стадиях разработки и исследований.

В обзоре рассмотрены исторические предпосылки возникновения ЭУРНО, схемы ускорения электронов в родотроне, риджтроне, фентроне и цилиндротроне. Дано описание основных элементов ЭУРНО: электронных пушек, ускоряющих резонаторов и поворотных магнитов. Приведены параметры действующих ускорителей. Показаны примеры применения ЭУРНО в различных радиационных процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маршалл Т. С.* Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987 (*Marshall T.* Free Electron Lasers. London: Macmillan, 1985).
2. *Pellegrini C., Marinelli A., Reiche S.* The Physics of X-Ray Free-Electron Lasers // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88. P. 015006-1–015006-55.
3. *Забаяев В. Н.* Применение ускорителей в науке и промышленности. Томск: ТПУ, 2008.
4. *Ekdahl C.* Modern Electron Accelerators for Radiography // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2002. V. 30. P. 254–261.
5. *Рабинович М. С.* Ускорители заряженных частиц. М.: Знание, 1957.
6. *Добрецов Ю. П.* Ускорители заряженных частиц в экспериментальной физике высоких энергий. М.: МИФИ, 2008.
7. *Karzmark C. J., Nunan C. S., Tanabe E.* Medical Electron Accelerators. New York: McGraw-Hill, Inc., 1993.
8. *Betz H.* High Resolution Lithography Using Synchrotron Radiation // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1986. V. 246. P. 658–667.
9. *Пикаев А. К.* Современное состояние радиационной технологии // *Успехи химии.* 1995. Т. 64. С. 609–640.
10. *Hamm R. W., Hamm M. E.* Industrial Accelerators and Their Applications. Singapore: World Sci. Publ. Co. Pte. Ltd., 2012.
11. *Chmielewski A. G. et al.* Operational Experience of the Industrial Plant for Electron Beam Flue Gas Treatment // *Rad. Phys. Chem.* 2004. V. 71. P. 439–442.
12. *Mehnert R.* Review of Industrial Applications of Electron Accelerators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1996. V. 113. P. 81–87.
13. *Pillai S. D., Shayanfar S.* Electron Beam Pasteurization and Complementary Food Processing Technologies. Cambridge: Woodhead Publ., 2015.
14. *Вальднер О. А., Власов А. Д., Шальнов А. В.* Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.
15. *Trump J. G., Van de Graaff R. J.* Design of a Million-Volt X-Ray Generator for Cancer Treatment and Research // *J. Appl. Phys.* 1937. V. 8. P. 602–606.
16. *Коломенский А. А., Лебедев А. Н.* Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962.

17. *Москалев В. А., Сергеев Г. И.* Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. Томск: ТПУ, 2012.
18. *Ананьев Л. М., Воробьев А. А., Горбунов В. И.* Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. М.: Госатомиздат, 1961.
19. *Москалев В. А.* Бетатроны. М.: Энергоиздат, 1981.
20. *Гринберг А. П.* Микротрон // УФН. 1961. Т. 75. С. 421–457.
21. *Капица С. П., Мелехин В. Н.* Микротрон. М.: Наука, 1969.
22. *Ципенюк Ю. М.* Фундаментальные и прикладные исследования на микротроне. М.: Физматлит, 2009.
23. *Rand R. E.* Recirculating Electron Accelerators. New York: Harwood Acad., 1984.
24. *Pottier J.* A New Type of RF Electron Accelerator: The Rhodotron // Nucl. Instr. Meth. B. 1989. V. 40/41. P. 943–945.
25. *Hayashizaki N., Hattori T., Odera M., Nakayama K., Isokawa K., Sato K., Fujisawa T.* Beam Acceleration Test of the Ridgetron Electron Accelerator // Nucl. Instr. Meth. B. 2002. V. 188. P. 243–246.
26. *Park M.-j., Kim H.-s., Kwon Y.-j., Kim K.-s., Chung K.-h., Chun M.-s., Shin H.-m., Lee K.-o.* Beam Dynamics Study of the Fantron-I // Proc. of EPAC, Vienna, 2000. P. 2615–2617.
27. *Chen Y., Huang W. H., Tang C. X.* Conceptual Design of the Cylindertron, a New Electron Accelerator // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 556. P. 38–44.
28. *Wideröe R.* Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen // Archiv Elektrotechn. 1928. V. 21. P. 387–405.
29. *Kerst D. W.* Acceleration of Electrons by Magnetic Induction // Phys. Rev. 1940. V. 58. P. 841.
30. *Гринберг А. П.* Ускорение электронов с помощью электромагнитной индукции (бетатрон Керста) // УФН. 1945. Т. 27. С. 31–71.
31. *Chakhlov V. L., Bell Z. W., Golovkov V. M., Shtein M. M.* Photoneutron Source Based on a Compact 10 MeV Betatron // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 422. P. 5–9.
32. *Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Склизов Г. В., Зысин Ю. А., Герасимов А. И.* Сильноточные безжелезные бетатроны // Докл. АН СССР. 1965. Т. 160. С. 68–70.
33. *Базаров Ю. В., Губачев В. А., Ловягин Б. М., Комрачков В. А., Панов К. Н., Подурец А. М., Руднев А. В., Сырунин М. А., Калашников Д. А., Назаров Д. В., Федоров А. В., Финюшкин С. А., Чудаков Е. А., Бельский В. М., Богданов Е. Н., Родионов А. В., Седов А. А., Тен К. А., Толочко Б. П.* Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
34. *Векслер В. И.* Новый метод ускорения релятивистских частиц // Докл. АН СССР. 1944. Т. 43. С. 346–348.
35. *Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.

36. *Henderson W. J., LeCaine H., Montalbetti R.* A Magnetic Resonance Accelerators for Electrons // *Nature*. 1948. V. 162. P. 699–700.
37. *Vognar M., Šimáně Ā., Chvátíl D.* Twenty Years of Microtron Laboratory Activities at CTU in Prague // *Acta Polytechnica*. 2003. V. 43. P. 50–58.
38. *Schiff L. I.* Production of Particle Energies beyond 200 MeV // *Rev. Sci. Instr.* 1946. V. 17. P. 6–14.
39. *Brannen E., Froelich H.* Preliminary Operation of a Four-Section Racetrack Microtron // *J. Appl. Phys.* 1961. V. 32. P. 1179–1180.
40. *Babić H., Sedlaček M.* A Method for Stabilizing Particle Orbits in the Race-Track Microtron // *Nucl. Instr. Meth.* 1967. V. 56. P. 170–172.
41. *Axel P., Hanson A. O., Harlan J. R., Hoffswell R. A., Jamnik D., Sutton D. C., Young L. M.* Microtron Using a Superconducting Electron Linac // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1975. V. 22. P. 1176–1178.
42. *Грибов И. В., Ермаков А. Н., Ишханов Б. С., Новиков Г. А., Скачков В. С., Собеннин Н. П., Тровер В. П., Шведунув В. И., Шведунув И. В.* Импульсный разрезной микротрон на энергию электронов 70 МэВ // *Вестн. МГУ: Физика. Астрономия*. 2002. Вып. 4. С. 62–63.
43. *Черняев А. П.* Ускорители в современном мире. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.
44. *Schriber S. O., Heighway E. A.* Double Pass Linear Accelerator — Reflexotron // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1975. V. 22. P. 1060–1064.
45. *Glamazdin A. V.* CEBAF Upgrade at Jefferson Laboratory // *Вопр. атом. науки и техники: Ядерно-физ. исслед.* 2013. № 6. С. 24–28.
46. *Гук И. С., Довбня А. Н., Кононенко С. Г., Пеев Ф. А., Botman J. I. M.* Рециркулятор SALO. Физическое обоснование // *Вопр. атом. науки и техники: Ядерно-физ. исслед.* 2015. № 6. С. 3–7.
47. *Guk I. S., Kononenko S. G.* Beam Dynamics in the Accelerator Complex SALO // *Вопр. атом. науки и техники: Ядерно-физ. исслед.* 2013. № 6. С. 123–127.
48. *Молодоженцев А. Ю.* Формирование и ускорение сильноточных электронных пучков в рециркуляторе на основе индукционного ускорителя. Автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ, 1994.
49. *Nguyen A., Pottier J.* Accelérateur d'électrons a cavité coaxiale. France Patent. 1987. No. WO 1988009597.
50. *Nguyen A., Pottier J.* Electron Accelerator Having a Coaxial Cavity. US Patent. 1988. No. 5,107,221.
51. *Jabbari I., Poursaleh A. M., Khalafi H.* Design Study of Double-Layer Beam Trajectory Accelerator Based on the Rhodotron Structure // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2016. V. 828. P. 72–80.
52. *Hayashizaki N., Hattori T., Odera M.* Development of the New Electron Accelerator Ridgetron // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1999. V. 427. P. 28–32.

53. Hayashizak N., Hattori T., Odera M., Nakayama K., Takeda O., Takama S., Yamaguchi A., Isokawa K., Sato K., Iwasaki K., Fujisawa T. The Electron Accelerator Ridgetron for Industrial Irradiation // Nucl. Instr. Meth. B. 2000. V. 161–163. P. 1159–1163.
54. Kwon H.-j., Kim H.-s., Kim K.-s., Chung K.-h., Park M.-j., Chun M.-s., Shin H.-m., Lee K.-o. Development of High Power Electron Accelerator for Industrial Applications // Proc. of EPAC, Vienna, 2000. P. 2612–2614.
55. Chen Y., Huang W.H., Tang C.X. Conceptual Design of the Cylindertron, a New Electron Accelerator // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 556. P. 38–44.
56. Bassaler J.M., Capdevila J.M., Gal O., Lainé F., Nguyen A., Nicolai J.P., Umias-towski K. Rhodotron: An Accelerator for Industrial Irradiation // Nucl. Instr. Meth. B. 1992. V. 68. P. 92–95.
57. Jongen Y., Abs M., Capdevila J.M., Defrise D., Genin F., Nguyen A. The Rhodotron, a New High-Energy, High-Power, CW Electron Accelerator // Nucl. Instr. Meth. B. 1994. V. 89. P. 60–62.
58. Abs M., Jongen Y., Poncelet E., Bol J.-L. The IBA Rhodotron TT1000: A Very High Power E-Beam Accelerator // Rad. Phys. Chem. 2004. V. 71. P. 285–288.
59. Cleland M.R. Industrial Applications of Electron Accelerators. Presentation on the CERN Accel. School, Zeegse, Netherlands, 2005.
60. Defrise D., Abs M., Genin F., Jongen Y. Technical Status of the First Industrial Unit of the 10 MeV, 100 kW Rhodotron // Rad. Phys. Chem. 1995. V. 46. P. 473–476.
61. Jongen Y. The Rhodotron, a New 10 MeV, 100 kW, CW Metric Wave Electron Accelerator // Nucl. Instr. Meth. B. 1993. V. 79. P. 865–870.
62. Park M.-j., Kim H.-s., Chun M.-s., Chung K.-h., Kwon H.-j., Lee K.-o. Error Analysis and Fabrication of the Prototype Bending Magnet for the Fantron-I // Proc. of the 2nd APAC, Beijing, 2002. P. 448–450.
63. Gal O., Bassaler J.M., Capdevila J.M., Lainé F., Nguyen A., Nicolai J.P., Umias-towski K. Numerical and Experimental Results on the Beam Dynamics in the Rhodotron Accelerator // Proc. of EPAC, Gif-sur-Yvette, France, 1992. P. 819–821.
64. Zimek Z. New Trends in Accelerators Development. Presentation on Consultants' Meeting on "Networking of Users of EB Facilities and the Role of the IAEA Collaborating Centres". Warsaw, 2015.
65. <http://www.iba-industrial.com>
66. Henniges U., Hasani M., Potthast A., Westman G., Rosenau T. Electron Beam Irradiation of Cellulosic Materials — Opportunities and Limitations // Materials. 2016. V. 6. P. 1584–1598.
67. Svoboda P., Svobodova D., Mokrejs P., Vasek V., Jantanasakulwong K., Ougizawa T., Inoue T. Electron Beam Crosslinking of Ethylene-Octene Copolymers // Polymer. 2015. V. 81. P. 119–128.
68. Salehi S.M.A., Mirjalili G., Amrollahi J. Effects of High-Energy Electron Beam on Low-Density Polyethylene Materials Containing Eva // J. Appl. Polymer Sci. 2004. V. 92. P. 1049–1052.

69. *Morata A., Bañuelos M. A., Tesfaye W., Loira I., Palomero F., Benito S., Callejo M. J., Villa A., Carmen González M., Suárez-Lepe J. A.* Electron Beam Irradiation of Wine Grapes: Effect on Microbial Populations, Phenol Extraction and Wine Quality // *Food Bioprocess. Technol.* 2015. V. 8. P. 1845–1853.
70. *Fuochi P. G., Lavalle M., Martelli A., Corda U., Cornia G., Kovács A.* Evaluation Test of the Energy Monitoring Device in Industrial Electron Beam Facilities // *Rad. Phys. Chem.* 2009. V. 78. P. 481–484.
71. *Matagne D., Delbar N., Hartmann H.-J., Gray M., Stickelmeyer M.* Development of a Process Using Electron Beam for a Terminal Sterilization for Parenteral Formulations of Pharmaceuticals // *Rad. Phys. Chem.* 2004. V. 71. P. 419–422.
72. *Zimek Z.* Electron Accelerators Applications. Presentation on CERN Accel. School: Adv. Accel. Phys., Warsaw, 2015.
73. *Korenev S., Kriebel J.* The Surface Modification of Dielectrics by a CW Electron Beam // *Vacuum.* 2001. V. 62. P. 237–240.
74. *Zarandi M. B., Bioki H. A., Mirbagheri Z.-a., Tabbakh F., Mirjalili G.* Effect of Crystallinity and Irradiation on Thermal Properties and Specific Heat Capacity of LDPE & LDPE/EVA // *Rad. Isotopes.* 2012. V. 70. P. 1–5.
75. *Hooshangi Z., Feghhi S. A. H., Sheikh N.* The Effect of Electron-Beam Irradiation and Halogen-Free Flame Retardants on Properties of Poly Butylene Terephthalate // *Rad. Phys. Chem.* 2015. V. 108. P. 54–59.
76. *Esteban R. M., Schütte K., Brandt P., Marquardt D., Meyer H., Beckert F., Mülhaupt R., Kölling H., Janiak C.* Iridium@Graphene Composite Nanomaterials Synthesized in Ionic Liquid as Re-Usable Catalysts for Solvent-Free Hydrogenation of Benzene and Cyclohexene // *Nano-Structures & Nano-Objects.* 2015. V. 2. P. 11–18.
77. *Janimak J. J., Marteleur M.* On the Suitability of Cerium Oxide Glass for Terminal Radiation Sterilization // *Rad. Phys. Chem.* 2004. V. 71. P. 195–198.
78. *Tabbakh F., Aldaavati M. M., Hoseyni M. S., Rezaee K., Saraee E.* Induced Photoneuclear Interaction by Rhodotron-TT200 10 MeV Electron Beam // *Pramana J. Phys.* 2012. V. 78. P. 257–264.
79. Таблицы физических величин / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
80. *Борискин В. Н., Дикий Н. П., Довбня А. Н., Медведева Е. П., Попенко В. А., Пугачев Г. Д., Тур Ю. Д., Уваров В. Л.* Разработка экологически безопасной технологии производства технеция-99m для ядерной медицины // *Вопр. атом. науки и техники: Ядерно-физ. исслед.* 1999. № 1. С. 54–56.
81. *Zarandi M. B., Tabbakh F., Bioki H. A.* Neutron Generation from 10 MeV Electron Beam to Produce ⁹⁹Mo // *Intern. J. Sci. Engin. Technol.* 2015. V. 4. P. 1–4.
82. *Ajji Z., Mirjalili G., Alkhatib A., Dada H.* Use of Electron Beam for the Production of Hydrogel Dressings // *Rad. Phys. Chem.* 2008. V. 77. P. 200–202.
83. *Ranjbar A. H., Aliabadi R., Amraei R., Tabasi M., Mirjalily G.* ESR Response of Bulk Samples of Clear Fused Quartz (CFQ) Material to High Doses from 10 MeV Electrons: Its Possible Application for Radiation Processing and Medical Sterilization // *Appl. Rad. Isotopes.* 2009. V. 67. P. 1023–1026.

84. *Nayefi M., Salari S., Sari M., Behgar M.* Treatment by Gamma or Electron Radiation Decreases Cell Wall and Gossypol Content of Cottonseed Meal // *Rad. Phys. Chem.* 2014. V. 99. P. 23–25.
85. *Shawrang P., Mansouri M. H., Sadeghi A. A., Ziaie F.* Evaluation and Comparison of Gamma- and Electron Beam Irradiation Effects on Total and Free Gossypol of Cottonseed Meal // *Rad. Phys. Chem.* 2011. V. 80. P. 761–762.
86. *Shawrang P., Sadeghi A. A., Behgar M., Zareshahi H., Shahhoseini G.* Study of Chemical Compositions, Anti-Nutritional Contents and Digestibility of Electron Beam Irradiated Sorghum Grains // *Food Chemistry.* 2011. V. 125. P. 376–379.