



Александр Петрович Черняев родился 25 декабря 1954 года. С отличием окончил физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (1981). Доктор физико-математических наук (2004). Опубликовал более 500 печатных работ, в том числе 28 учебных пособий и монографий. С 2005 г. — профессор физического факультета МГУ, с 2006 г. — заведующий кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. Проректор МГУ в 2006–2015 гг.

А. П. Черняев является высококвалифицированным специалистом, успешно работающим в области взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, применения ускорителей в медицине, радиационных технологий. А. П. Черняев сочетает научно-исследовательскую деятельность с активной педагогической работой. Под его руководством защищено 5 кандидатских и 1 докторская диссертации, более 40 дипломных работ. А. П. Черняев является одним из инициаторов развития в МГУ нового учебно-научного направления — медицинской физики. Является первым вице-президентом Ассоциации Медицинских физиков России. При его активном участии развивается специальность «медицинская физика» в России. Под его руководством разработаны Программы профессиональной переподготовки медицинских физиков и специалистов по применению радиационных технологий в народном хозяйстве. Кафедрой с 2000 г. подготовлено и переподготовлено около 200 специалистов в области радиационных технологий.

ISBN 978-5-19-011409-6



9 785190 114096

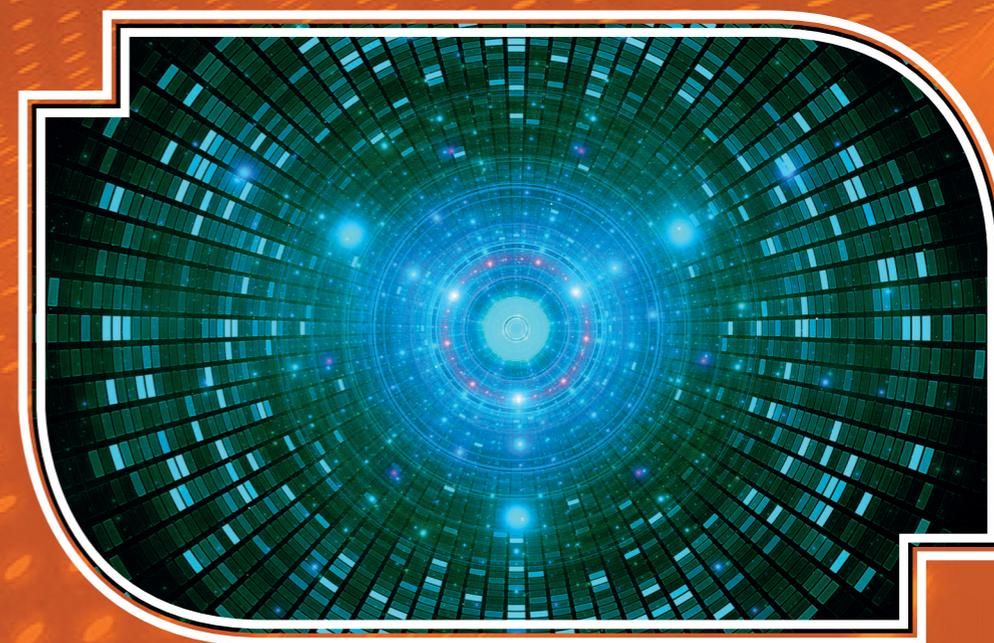
А. П. ЧЕРНЯЕВ      Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина

Научно-популярная серия РФФИ

А. П. Черняев

# РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Наука. Народное хозяйство. Медицина



2019

Московский государственный университет  
имени М. В. Ломоносова

Научно-популярная серия РФФИ

**А. П. Черняев**

# **РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Наука. Народное хозяйство. Медицина**



Издательство  
Московского университета  
2019



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 19-12-40002, не подлежит продаже

**Черняев, А. П.**

Ч-49 Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина / Москва : Издательство Московского университета, 2019. — 231, [3] с. : ил. ISBN 978-5-19-011409-6

Монография подготовлена для сотрудников, студентов, аспирантов, специализирующихся в области использования ядерных технологий и методов ядерной физики в медицине, народном хозяйстве и науке. Монография составлена на основе курсов лекций «Ускорители заряженных частиц», «Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом» и «Ядерно-физические методы в медицине», «Радиационные технологии», читавшихся на физическом факультете Московского университета. Используются также материалы докладов и научных обзоров, изданных в ведущих российских научных журналах. Настоящая монография не имеет аналогов в российской и зарубежной научной литературе.

Монография предназначена сотрудникам и студентам физических, химических, биологических, медицинских, инженерных, а также других естественно-научных специальностей. Книга будет полезна специалистам, работающим в разных областях науки и отраслях народного хозяйства, а также бизнесменам.

**УДК 621.386**  
**ББК 22.38**

**Chernyaev A. P.**

Radiation Technologies. Science. National Economy Medicine. Moscow: Moscow University Press, 2019. 234 p. 73 Ill., 35 Tab.

ISBN 978-5-19-011409-6

The present monograph is meant for researchers, graduate and postgraduate students specializing in the use of nuclear technologies and methods of nuclear physics in medicine, economy and science. The monograph was compiled both on the basis of university courses, such as “Charged Particle Accelerators”, “Interaction of Ionizing Radiation with Matter” and “Nuclear Physics Methods in Medicine”, “Radiation Technologies”, taught at the Physics Department of Moscow University, and on the basis of materials like reports and scientific reviews published in leading Russian scientific journals. This monograph has no analogues in Russian and foreign scientific literature. The monograph can be of use to researchers and students of physical, chemical, biological, medical and other natural sciences, as well as engineering. It could also be useful to specialists working in various fields of science and sectors of national economy, as well as to businessmen.

*Key words:* radiation technologies, nuclear medicine, radiation sterilization, radiation synthesis of radiation polymerization, accelerators, isotopes

# Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>Введение</b> .....	6
<b>Глава 1. Ускорители в науке</b> .....	16
1.1. Ускорители в ядерной физике .....	22
1.2. Ускорители в физике элементарных частиц .....	38
1.3. Получение на ускорителях пучков вторичных частиц .....	49
1.4. Лазер на свободных электронах .....	59
<b>Глава 2. Ускорители в промышленности</b> .....	62
2.1. Ионная имплантация .....	68
2.2. Неразрушающий контроль .....	78
2.3. Ускорители для безопасности и обороны .....	83
2.4. Электронная обработка материалов .....	92
2.5. Радиационное производство .....	95
2.5.1. Радиационная полимеризация .....	96
2.5.2. Радиационное модифицирование материалов .....	102
2.5.3. Радиационная деструкция .....	106
2.5.4. Изменение цвета изделий из драгоценных и полудрагоценных камней .....	106
2.5.5. Получение нанопорошков .....	109
2.6. Ускорители в энергетике .....	110
2.7. Получение радиоактивных изотопов .....	113
<b>Глава 3. Радиационные технологии в радиоэкологии и сельском хозяйстве</b> .....	116
3.1. Радиационная биология .....	117
3.1.1. Физические механизмы действия ионизирующих излучений на биологические ткани .....	118
3.1.2. Особенности взаимодействия частиц с биологическими тканями .....	124
3.2. Радиационная стерилизация в медицине .....	128
3.3. Радиационная обработка продуктов питания .....	132
3.4. Радиация в сельском хозяйстве .....	147
3.5. Радиационная экология .....	150

<b>Глава 4. Радиационные технологии в медицине</b> .....	160
4.1. Ускорители электронов в лучевой терапии .....	160
4.1.1. Медицинские ускорители электронов.....	163
4.1.2. Ускорители в стереотаксической хирургии .....	171
4.1.3. Интраоперационная лучевая терапия .....	176
4.1.4. Томотерапия.....	180
4.2. Медицинские ускорители протонов и ионов.....	183
4.3. Источники нейтронов в лучевой терапии.....	193
4.4. Ускорители в лучевой диагностике .....	195
4.5. Ускорители в ядерной медицине .....	205
<b>Приложение 1</b> .....	210
<b>Приложение 2</b> .....	213
<b>Приложение 3</b> .....	223
<b>Литература</b> .....	229

# Предисловие

В современном обществе ускорители из научного исследовательского прибора превратились в повседневно необходимый инструмент во многих отраслях промышленного и сельскохозяйственного производства, в ядерной медицине, в частности в лучевой терапии и диагностике.

Необходимость подготовки монографии, в первую очередь, обусловлена быстрым ростом высоких наукоемких технологий в мировой экономике. Это приводит к резкому увеличению числа ускорителей во всех отраслях мирового хозяйства, насыщению современных промышленных, торговых, сельскохозяйственных предприятий и медицинских учреждений высокотехнологичной ускорительной техникой. Для работы на ней необходима подготовка высококвалифицированных специалистов радиационных физиков, химиков, биологов, медиков, инженеров и специалистов других естественно-научных специальностей.

Цель создания настоящей монографии — описать физические принципы наиболее распространенных радиационных технологий, основанных на использовании ускорителей заряженных частиц.

Автор благодарит за помощь в подготовке материалов сотрудников кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ, а также студентов — бакалавров и магистрантов.

Автор будет признателен всем, кто выскажет пожелания по совершенствованию настоящего издания. Их следует направлять по адресу: Москва, 119899, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины.

# Введение

Исследование строения вещества привело к открытию проникающих излучений. Ю. Плюккером в 1859 г. были открыты катодные лучи, а В. Рентген в 1895 г. обнаружил, что при попадании их на анод возникают X-лучи, или рентгеновское излучение<sup>1</sup>. В 1896 г. А. Беккерелем открыта радиоактивность некоторых веществ.

С этого времени, особенно после открытия Рентгеном возможности получать снимки костной ткани животных и человека, началось практическое использование ионизирующих излучений. В России ионизирующие излучения стали использовать в медицине уже через несколько лет после их открытия. Во время русско-японской войны 1903–1904 гг. рентгеновские установки стояли на флагманских кораблях. Их использование для определения переломов и мест нахождения осколков и пуль в теле человека позволяло спасать большое количество жизней. В 1918 г. в России была образована первая рентгенологическая клиника. С начала XX столетия наступила эра использования ионизирующих излучений.

Спустя 120 лет после этих великих открытий уже трудно представить развитие нашей цивилизации без их использования. Невозможно представить, например, медицинского обследования без использования рентгеновских лучей.

К настоящему времени в различных радиационных технологиях по всему миру (в промышленности, сельском хозяйстве, в медицине и фундаментальной науке) используют более 10 млн источников ионизирующих излучений<sup>2</sup>. Это рентгеновские трубки (их число в мире составляет миллионы), естественные и искусственно полученные изотопы. Количество используемых в мире радиоактивных источников может достигать нескольких миллионов единиц. Приборов, использующих радиоактивные изотопы для лучевой диагностики, насчитывается около 20 тыс. Один из важнейших источников электроэнергии для нашей цивилизации — это АЭС, энергоблоков которых в мире 449.

Электронных микроскопов, которые, по сути, тоже электростатические ускорители, — многие десятки тысяч. До начала 1930-х гг. проникающие излучения получали в рентгеновских трубках из естественных источников.

В настоящее время источники ионизирующих излучений приобрели широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства. К ним

<sup>1</sup> Рентгеновским излучением считается электромагнитное излучение с энергией от 30 эВ до 250 кэВ.

<sup>2</sup> Точно оценить их количество практически невозможно.

относятся дефектоскопы, досмотровые комплексы, радионуклидные источники и приборы, рентгеновские медицинские аппараты, ускорители заряженных частиц, хранилища радиоактивных отходов и ядерного топлива, ядерные реакторы и другие устройства.

Всего в народном хозяйстве нашей страны на 1 января 2016 г. использовалось 147 177 000 источников ионизирующих излучений. Они располагаются в различных организациях и учреждениях: АЭС, геологических и добывающих предприятиях, медицинских, научных, учебных, промышленных и таможенных учреждениях, пунктах захоронения радиоактивных веществ. Среди них примерно 59 500 рентгеновских аппаратов. Основная их доля действует в медицинских целях (47 676), а также в промышленности в дефектоскопии (8294) и в досмотровых комплексах (3632). Закрытые радионуклидные источники составляют 60 611 единиц, а радиоизотопных приборов 14 618. Ускорителей заряженных частиц в нашей стране 473 (398 ускорителей электронов, 75 — протонов и ионов), 183 кобальтовые установки, ядерных реакторов 138.

У нас в среднем по стране один рентгеновский медицинский аппарат приходится на 3200 жителей, а в Москве и Санкт-Петербурге — на 2000 жителей.

После открытия Э. Резерфордом атомного ядра и осуществления первой искусственной реакции под действием  $\alpha$ -частиц начались обширные эксперименты по исследованию ядер.

Однако для этих целей не хватало энергии и интенсивности пучков частиц. Это стало толчком для идей создания установок, позволяющих искусственным образом увеличивать энергию заряженных частиц — ускорителей. В 1930-е гг. физиками были созданы новые виды источников ионизирующих излучений — ускорители заряженных частиц.

В конце 1920-х — начале 1930-х гг. были разработаны и запущены первые ускорители. Среди открытий в области ускорительной техники выделим важнейшие достижения.

Норвежский ученый Рольф Видероз построил первый в истории ускоритель в немецком Аахене еще в 1928 г. Его линейный ускоритель работал на переменном напряжении, разгоняя ионы калия в 88-сантиметровой стеклянной трубке, достигая энергии, равной двум пиковым напряжениям источника питания. Работал он на принципе резонансного ускорения, который использует широкий спектр современных ускорителей.

Эрнест Лоуренс вместе со своим учеником М. Ливингстоном построил первый циклический ускоритель (циклотрон) с диаметром окружности около 4 дюймов (~10 см) и запустил его в Беркли в 1931 г. В магнитном поле частицы удалось запустить по спирали. Он применил тот же резонансный принцип ускорения, что и Видероз.

В 1932 г. Джон Кокрофт и Эрнест Уолтон первыми разделили атомное ядро с помощью искусственно ускоренных частиц, направив протонный

пучок на литиевое ядро. Им удалось поднять энергию частиц, используя оригинальную радиосхему удвоения напряжения.

В 1931 г. Ван де Граафом был создан электростатический ускоритель. Ускоритель создает высокое напряжение благодаря зарядке большой сферы с помощью подвижного механизма нанесения заряда.

В 1940 г. Д. Кернст, ученый из Университета Иллинойса, усовершенствуя циклотрон, построил циклический ускоритель электронов (бетатрон), в котором большим магнитным полем электроны удерживались на стационарных орбитах<sup>3</sup>.

В 1940 г. изобретен синхроциклотрон (фазотрон), который позволил поднять энергию ускоряемых протонов до энергии порядка 1 ГэВ. Это удалось осуществить изменением частоты переменного электрического поля.

После Второй мировой войны на основе микроволновых технологий, разработанных для военных радаров, был построен первый современный линейный ускоритель.

В 1946 г. в университете Беркли Луисом Альваресом был построен протонный ускоритель на стоячих волнах. А в 1947 г. уже в Стэнфорде группой ученых был сконструирован и первый ускоритель электронов на бегущей волне.

В 1946 г. в General Electric запущен первый американский электронный синхротрон. Это привело к открытию в 1947 г. синхротронного излучения, возникающего при движении электрона по окружности.

Открытие в 1952 г. принципа сильной фокусировки, позволяющего фокусировать пучок частиц магнитами в двух плоскостях, сделало возможным создание протонных синхротронов больших размеров, первые из которых появились в Брукхейвене (США) и ЦЕРН<sup>4</sup>. Самая совершенная установка такого типа — большой адронный коллайдер.

Создание в 1960-е гг. ускорителей на встречных пучках, использующих накопительные кольца, позволило усовершенствовать качество эксперимента и эффективно использовать энергию пучка в системе центра масс. В 1989 г. в Стэнфорде начал свою работу первый в мире линейный коллайдер.

За 80 лет с момента изобретения ускорителей энергия пучков в них возросла в сто миллионов раз, интенсивность пучков — в миллион, яркость (как мера геометрической, временной и спектральной точности) — более чем на 10 порядков.

Мало кто думал, что ускорители спустя три четверти века станут играть в развитии нашей цивилизации такую же важную роль, как лазер, ракета, самолет, космический аппарат, т. е. окажутся одним из ярчайших достижений человечества. Ускорители стали не только важнейшим инструментом ученых,

<sup>3</sup> В 1957 г. был открыт первый медицинский центр лечения рака с помощью бетатрона.

<sup>4</sup> Эти ускорители успешно работают и в медицине. Медицинский протонный синхротрон установлен в радиологическом онкологическом центре им. С.А. Цыба в Обнинске.

они стали проникать в различные области деятельности — промышленность, сельское хозяйство и медицину. Размеры ускорителей стали уменьшаться, а характеристики варьироваться в широких пределах, позволяя решать все более широкий круг задач.

В науке появились сложнейшие ускорительные комплексы (синхротроны, коллайдеры, линейные ускорители), позволяющие ускорять частицы до сверхвысоких энергий — сотни ГэВ и даже единицы ТэВ. Именно эти сложные и дорогие ускорители сформировали у населения мнение о том, что ускоритель — это обязательно очень большая установка. На самом деле большая часть ускорителей — небольшие установки, предназначенные для решения конкретных задач в народном хозяйстве.

Ускорители широко используются как в научных исследованиях в ядерной физике и физике элементарных частиц, так и в прикладных областях — в промышленности, биологии, медицине, экологии. Хотя ускоритель — сложный высокотехнологичный продукт деятельности человека, и создавался он в первую очередь для научных исследований, спустя время ему удалось прочно войти в нашу жизнь и стать неотъемлемой частью многих технологических процессов.

Они активно используются в энергетике и при решении задач обеспечения национальной безопасности. Их применение создает много новых рабочих мест в высокотехнологичных отраслях мирового хозяйства. Внедрение инновационных технологий на базе ускорителей позволит в будущем сделать ядерную энергетику более безопасной и значительно, в результате переработки отработанного ядерного топлива, сократить количество отходов. Пучками электронов можно уменьшать количество и улучшать состав выброшенных газов, очищать загрязненную воду, делая ее пригодной для питья. Достижения в области лучевой терапии позволяют при лечении раковых заболеваний передавать опухолевым тканям все большую энергию пучка частиц при минимизации повреждения здоровых тканей. Ускорители являются инструментом производства необходимых для медицины изотопов, которые в настоящее время создаются в ядерных реакторах. В промышленности использование ускорителей позволяет запустить сотни новых производств и усовершенствовать действующие производственные процессы.

Для безопасности и обороны компактные, удобные в использовании ускорители могут иметь множество применений от досмотра грузов до мониторинга соблюдения международного запрета на проведение ядерных испытаний. Пучки частиц различного типа из ускорителей со специально подобранной энергией и интенсивностью могут повысить экологичность получения электроэнергии, улучшить технологии производства шин, моделировать белки, изучать ядерные взрывы, создавать новые лекарства, производить термостойкие кабели, уменьшать количество ядерных отходов, обнаруживать подделки произведе-

дений искусства, легировать полупроводники, разведывать месторождения нефти, устанавливая возраст археологических находок.

Дальнейшее развитие ускорительных технологий позволит ученым совершать открытия в широких пределах знания: от физики элементарных частиц до биологии, позволит исследовать тайны Вселенной, в том числе создавать принципиально новые виды космической связи и исследовать внутренний состав нашей планеты.

Общее число действующих в мире ускорителей в науке, промышленности и медицине оценивалось примерно в 43 тыс. к середине 2017 г. Это число носит ориентировочный характер, поскольку одни ускорители вводятся в эксплуатацию, другие выходят из строя, а использованные при оценке данные порой относятся к источникам разных лет; не исключена и вероятность их пересечения. Кроме того, приведенное число не включает в себя ускорители, используемые в закрытых работах, в частности в оборонной промышленности. Несмотря на все оговорки, число действующих и строящихся ускорителей свидетельствует об огромном значении этих высокотехнологичных инструментов в жизни цивилизации. Ускорители стали крайне необходимым прибором не только в науке, но также в промышленности, сельском хозяйстве, в медицине. С каждым годом они проникают во все новые отрасли мирового хозяйства и становятся эффективными, а порой и незаменимыми инструментами.

Рынок медицинских и промышленных ускорителей составлял около 4.7 млрд долларов на середину 2017 г., и эта сумма увеличивается более чем на 10% ежегодно. Вся цифровая электроника сейчас зависит от пучков частиц для ионной имплантации. Ежегодно с помощью ускорителей создается материалов более чем на 1.5 млрд долларов. Стоимость продуктов, обработанных на ускорителях, ежегодно составляет более чем 500 млрд долларов.

В представлении обычного человека, не работающего в физике ядра и частиц, ускоритель — сугубо научный прибор и к практической жизни отношения не имеет. Однако на самом деле в научных исследованиях используется менее 5% всех существующих в мире ускорителей.

Число ускорителей, используемых в мировой науке и хозяйстве, показано на рис. 1.1.

Большую часть представляют ускорители электронов невысоких энергий (высоковольтные и линейные ускорители). В мире действует сравнительно небольшое число ускорителей электронов других типов: бетатронов ~1000, микротронов ~130, электронных синхротронов ~70. Основную часть ускорителей протонов и ионов представляют низкоэнергетические высоковольтные ускорители (более 12 000), примерно 1500 циклотронов, около 300 протонных синхротронов и линейных ускорителей протонов, 20 фазотронов, из которых лишь несколько единиц продолжают использоваться.

<b>Всего ~43 000</b>		
<b>Медицина ~14 500</b>	<b>Наука ~1 500</b>	<b>Народное хозяйство ~27 000</b>

Рис. 1.1. Ускорители в мировом хозяйстве

<b>Всего ~43 000</b>		
<b>Ускорителей электронов ~27 000</b>	<b>Ускорителей протонов ~4000</b>	<b>Ускорителей протонов и ионов ~12 000</b>

Рис. 1.2. Число ускорителей электронов, протонов и ионов в мировом хозяйстве

По типам ускоряемых частиц ускорители делятся на три группы: ускорители электронов, протонов и ионов (рис. 1.2), и все они применяются в науке и различных отраслях народного хозяйства. В основном это линейные ускорители различных типов. Общее число циклических ускорителей находится в пределах 2000. Ускорителей протонов и ионов действует примерно 16 000. Среди них основную часть составляют высоковольтные и линейные ускорители (~13 500) и циклотроны (~1500). Доля остальных типов ускорителей не превышает 0.5%.

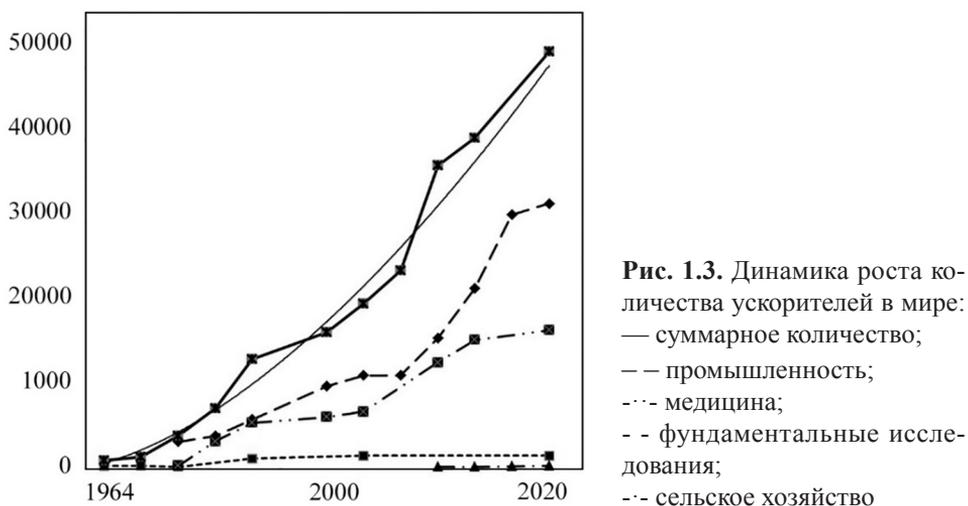
Ускорителей электронов используется около 27 000, в основном это также высоковольтные и резонансные линейные ускорители. Число кольцевых ускорителей электронов (бетатронов и синхротронов) небольшое — порядка 1000.

Ускорителей электронов в народном хозяйстве и медицине действует примерно одинаковое количество — по 13 500. Ускорители тяжелых заряженных частиц — это в основном имплантаторы ионов низких энергий, которые используются в промышленности.

В научных лабораториях и ускорительных комплексах в мире действует примерно 1200 ускорителей для исследований в ядерной физике и физике элементарных частиц. Число ускорителей, используемых в промышленности, составляет около 27 000. К этому числу следует добавить более 14 200 ускорителей, работающих в медицине<sup>5</sup>.

Общее число ускорителей ежегодно увеличивается на 500–900 единиц.

<sup>5</sup> На практике только в медицине используется более 1500 радиоактивных излучателей <sup>60</sup>Co. Здесь не учитывается число рентгеновских трубок, представляющих собой простейший низкоэнергетический ускоритель, которых, пожалуй, в сотни раз больше, чем ускорителей.



На рис. 1.3 представлена динамика роста числа ускорителей в науке, медицине, промышленности и сельском хозяйстве. Видно, что число ускорителей в мировом хозяйстве стабильно увеличивается. В науке количество ускорителей в течение последних 20 лет практически не меняется, в основном происходит их качественное обновление. Тем не менее количество ускорителей в мире ежегодно возрастает по разным оценкам на 2–10%.

В ядерной физике ускорители являются основным инструментом для проведения исследований. Помимо ускорителей в ядерно-физических исследованиях используются радиоактивные источники, реакторы, но их доля в общем числе исследований меньше по сравнению с использованием ускорителей, и во многих задачах они не могут их заменить.

В физике элементарных частиц для исследований могут быть использованы как ускорители, так и космические лучи. Однако в этом случае роль ускорителей еще больше, чем в ядерной физике, поскольку интенсивность космических лучей относительно невелика. К тому же менять характеристики спектра космических лучей практически невозможно. Поэтому круг исследовательских задач в области физики элементарных частиц с применением космических лучей ограничен, хотя с их помощью решают важные исследовательские задачи.

В промышленности основная часть ускорителей используется в радиационных технологиях, радиационной химии, в биологии и медицине, а также в сельском хозяйстве и экологии.

Приведем несколько примеров из обзорных статей и отчетов МАГАТЭ. В 2007 г. промышленные ускорители по разным регионам земного шара распределялись следующим образом: Северная Америка — 24%, Европа — 25%, Восточная Азия — 36%, Латинская Америка — 7%, Западная Азия —

4%, Африка — 4%. Согласно опубликованным данным МАГАТЭ, в мире в настоящее время выпускается продукции с использованием радиационных технологий на сумму более 500 млрд долларов.

За пятьдесят лет количество ускорителей, используемых в мировом хозяйстве, возросло более чем в 20 раз. За 30 лет (до середины 1980-х гг.) оно возросло примерно в 10 раз, а за последнее десятилетие — более чем в 2 раза. К 1970 г. более 80% действующих в мире ускорителей работало в промышленности. Однако в значительной степени это были пилотные экспериментальные проекты, поэтому границы между фундаментальными исследованиями и промышленным использованием ускорителей были достаточно размыты.

К началу нового тысячелетия сложилось близкое к нынешнему соотношение ускорителей в науке, промышленности и медицине. Границы между типами ускорителей для различных направлений использования стали более четкими. Так, например, вполне определенными параметрами характеризуются медицинские ускорители для лучевой терапии, стереотаксической хирургии, производства изотопов для медицинских целей.

В России радиационные технологии развиваются с шестидесятых годов. До девяностых годов в основном исследовались различные методики их использования. В девяностые годы из-за сильного спада промышленного производства исследования в этой области замедлились. Однако в последние годы вновь наметилась тенденция к развитию радиационных технологий, которая базируется в первую очередь на высоких экономических показателях.

Несмотря на то, что исследования российских ученых успешно используются во всем мире, отечественная промышленность практически не имеет отработанных технологий по радиационной обработке продукции, соответствующих мировым стандартам из-за отсутствия достаточного количества квалифицированных специалистов и технологического оборудования — в большинстве своем оно было произведено более 20 лет назад.

В мире существует около 70 производителей ускорителей. К наиболее крупным среди них относятся компании Varian (США), Elekta (Швеция), IBA (Бельгия), NHV Corporation (Япония). Ежегодный выпуск ускорителей в последние годы постоянно увеличивается. Если же нынешние темпы ввода ускорителей в эксплуатацию сохранятся, то к 2020 г. их количество может превысить 50 000 единиц.

Основными производителями ускорителей техники для промышленных целей являются группа компаний Siemens, Varian, Philips, IBA (Бельгия), Energy Science Inc. (США), NHV Corporation (Япония).

Группа IBA работает с 1986 года, однако в нее входят компании, учрежденные значительно раньше, например, занимающаяся выпуском ускорителей Radiation dynamics Inc. (США). Основным потребителем ускорителей явля-

ются США и Западная Европа, а также в небольшой степени Восточная Азия. Продажи ускорительной техники только компанией ИВА уже в 2004–2005 гг. превышали €73 млн; 56% их продаж приходится на Америку, 27% — на Западную Европу и 10% — на Азию. Всего компанией за 30 лет существования продано свыше 250 ускорителей и более половины из них — за последнее десятилетие, что говорит о растущих темпах роста рынка и широком развитии радиационных технологий за рубежом.

В России серийное производство ускорителей осуществлялось Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера, НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова (Санкт-Петербург), НПП «Торий», Томским политехническим институтом. Ряд ускорителей электронов, протонов и ионов создан в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна), НИЦ «Курчатовский институт», Институте физики высоких энергий, Московском радиотехническом институте, НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ и других НИИ.

Институт ядерной физики СО РАН построил около 120 высоковольтных ускорителей. Данные о распределении продаж по регионам страны не приводятся. Известно, что ИЯФ СО РАН при производстве ускорителей в основном ориентируется на рынки Японии, Китая, Южной Кореи и Индии.

НИИЭФА к настоящему времени построил более 100 ускорителей электронов, в том числе шесть — для исследовательских центров и предприятий Ливии, Германии, Болгарии и Кубы.

Около тысячи бетатронов построено в Томске, основная их часть продана за границу, преимущественно в США.

Ряд ускорителей электронов, протонов и ионов построен в ИТЭФ, ОИЯИ, ИФВЭ, Курчатовском институте, НИИЯФ МГУ, МИФИ.

Всего у нас в стране построено для научных и прикладных задач около 1300 ускорителей, которые нашли применение не только в России и странах бывшего СССР, но и в других странах, включая Германию и Японию.

Согласно статистическим данным, в России по состоянию на 2017 г. действовало примерно 400 ускорителей электронов и 50 ускорителей протонов. Распределение ускорителей в отраслях народного хозяйства России значительно отличается от мирового. Так, в науке задействовано около 20% работающих в стране ускорителей, в промышленности — 30%, в медицине — 50%. Основная часть последних (около 90%) используется в лучевой терапии, остальные — в радиоизотопной диагностике и терапии.

Потребности науки и мирового хозяйства выдвигают требования, устанавливающие приоритеты развития ускорительной техники. Это возможность создания высокотемпературных радиочастотных структур, позволяющих поднять порог темпа ускорения заряженных частиц до 100 МэВ/м. Разрабатываются новые методики на основе возможностей применения лазерного

ускорения, что позволит достичь темпа ускорения 1 ГэВ/м, диэлектрического кильватерного ускорения — нескольких ГэВ/м, а также комбинирования этих методов, что позволит поднять темп ускорения частиц до  $>10$  ГэВ/м. Это приведет к появлению ускорителей более высоких энергий и компактных световых источников в ближайшие годы.

Для коллайдеров высоких энергий требуются магниты с более высокими критическими магнитными полями, чем это возможно сегодня. Сверхпроводники с высокой критической температурой (HTS, High-critical-temperature) позволяют получать магнитные поля свыше 12 Тл, рабочей температурой порядка 50 К, имеющие пониженную чувствительность к изменению рабочей температуры. Исследовательской проблемой является изучение свойств материалов, максимальных токовых нагрузок проводников и стоимость работ.

Использование магнитных полей с большими напряженностями ведет к появлению более компактных циклических ускорителей и приводит к повышению энергии столкновений, а также открывает возможности для эффективных систем фокусировки в приложении к областям исследований с высокими интенсивностями. Высокотемпературные сверхпроводящие магниты обладают высоким потенциалом для развития магнитных технологий.

# Глава 1

## Ускорители в науке

Большая часть ускорителей, применяющихся в фундаментальных исследованиях<sup>6</sup>, имеет невысокие энергии — от единиц до сотен МэВ. Они применяются для исследований в ядерной физике, радиационной биологии, радиационной химии, в разработке новых технологий для промышленности.

Несмотря на то, что доля «научных» ускорителей постепенно уменьшается, их влияние на развитие ускорительной техники остается определяющим. Для их совершенствования используются новейшие технологии и достижения из смежных направлений физики, например радиофизики, физики низких температур, физики твердого тела. На них рождаются радиационные технологии, открывающие перспективы для более широкого внедрения ускорителей в промышленности, медицине и сельском хозяйстве.

Все шире ускорители научных лабораторий применяются для решения прикладных задач, базирующихся на радиационных технологиях. Так, например, наноматериалы получают в научных лабораториях. Разработанные для этих целей радиационные методики являются предметом обширных научных исследований.

В настоящее время более чем в двухстах исследовательских центрах мира действуют около 1200 ускорителей. Они включают в себя протонные и электронные синхротроны, фазотроны, микротроны, бетатроны, циклотроны, линейные ускорители (высоковольтные, резонансные и индукционные).

В фундаментальной науке большая часть ускорителей используется в научных исследованиях в физике ядра и частиц при низких (до 10 МэВ) и средних (10 МэВ–1 ГэВ) энергиях. Для исследовательских работ в области взаимодействия частиц на сверхмалых расстояниях необходимы ускорители высоких энергий (более 1 ГэВ) и сверхвысоких энергий (более 1 ТэВ).

На начальных этапах своего развития ускорители создавались главным образом в научно-исследовательских целях, но скоро доля ускорителей в фундаментальной науке значительно уменьшилась. К началу 1960-х гг. доля

---

<sup>6</sup> Цель настоящей главы — не описать все достижения ядерной физики (это в рамках не только одной главы, но и одной книги просто невозможно), а подчеркнуть роль в ее развитии целой плеяды поистине великих ученых, создававших образ современной цивилизации, разрабатывая, развивая и используя ускорители заряженных частиц.

ускорителей, используемых в научных исследованиях, составляла около 36% от общего числа ускорителей в мире, а уже к концу десятилетия она уменьшилась примерно до 7%. К началу нового тысячелетия доля установок для научных исследований сократилась до ~3%, и многие из этих установок используются для решения как научных, так и прикладных задач.

Ускорителей высоких энергий в мире еще в 1974 г. было 52. Сейчас их около 110. Из них девять в России и два в других странах СНГ (табл. 1.2).

Ускорители высоких энергий можно условно разделить на несколько групп: комплексы на встречных пучках, протонные и электронные синхротроны, источники синхротронного излучения. В мире сейчас работают семь комплексов со встречными пучками, в нашей стране два таких комплекса действуют в ИЯФ СО РАН (табл. 1.1).

Самый крупный в мире ускорительный комплекс расположен в ЦЕРН. В его состав входят восемь ускорителей различного типа. В четырех из них частицы ускоряются до энергий выше 1 ГэВ, а в кольце Большого адронного коллайдера сталкиваются пучки протонов, которые разогнаны до энергии 7 ТэВ. До 2011 г. в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США) функционировал протонный синхротрон — Теватрон, с энергией встречных пучков  $0.98 \times 0.98$  ТэВ. Он завершил свою работу после 28 лет эксплуатации. В табл. 1.2 представлены характеристики крупнейших протонных и электронных синхротронов, действующих в настоящее время.

Среди электронных синхротронов отдельную большую группу составляют источники синхротронного излучения (СИ). Значительная часть синхротронов имеет энергию выше 1 ГэВ (по нашим оценкам, это число составляет 73–76). В мире работает 76 лабораторий, в которых есть один или несколько источников СИ. Общее число источников СИ в этих лабораториях составляет 83 единицы. Основные страны, владеющие такими центрами, — это США, Япония и Германия. Россия по количеству источников СИ находится на четвертом месте.

В последнее время на основе электронных синхротронов создаются лазеры на свободных электронах, которые являются источниками СИ нового поколения. В Новосибирске работает такой лазер на свободных электронах в терагерцовой области излучения.

Ускорителей протонов и ионов, имеющих высокие энергии (~1 ГэВ и выше), в мире примерно полсотни (протонных синхротронов ~15, электронных синхротронов ~25, линейных ускорителей электронов 5–10). Один протонный синхротрон БАК в ЦЕРН имеет сверхвысокие энергии встречных пучков протонов  $7 \times 7$  ТэВ<sup>7</sup>.

Задачи, решаемые на ускорителях, в научных исследованиях в течение длительного времени были связаны с ядерной физикой. Только в середине

<sup>7</sup> К сожалению, ускорительно-накопительный комплекс на встречных пучках с энергией  $1.5 \times 1.5$  ТэВ в ИФВЭ (Протвино) так и не был достроен после 1991 г.

Таблица 1.1

Ускорительные комплексы на встречных пучках

Название	Дата пуска	Тип частиц	Длина орбиты, м	Максимальная энергия, ГэВ	Светимость, $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Точки пересечения
ЭПП-4М Россия	1992	$e^+e^-$	366	6	до 100	1
ВЭПП 2000 Россия	2006	$e^+e^-$	24	1	100	2
RHIC США	2000	$p$ ионы	3833	100 на нуклон	$p$ : 14 $Au$ : 0.1	6
ВЕРС-II Китай	2007	$e^+e^-$	238	3.7	1000	2
КЕКВ Япония	1999	$e^+e^-$	3000	$e^-$ : 8 $e^+$ : 3.5	11 000	1
ЛHC CERN	2008	$p$ ионы	26 659	$p$ : 7700 $Pb$ : 631 000	$pp$ : $1.7 \cdot 10^4$ $Pb$ : 0.002	$pp$ : 3 $Pb$ : 1
DAΦNE Италия	1999	$e^+e^-$	98	0.7	450	1

Таблица 1.2

## Некоторые действующие синхротроны ведущих ускорительных центров мира

Научный центр	Название ускорителя	Дата пуска	Ускоряемые частицы	Диаметр кольца, м	Максимальная энергия, ГэВ / нуклон
ЦЕРН, Европа	PS	1959	p, ионы	185	26
	SPS	1976	p, ионы	2200	450
	LHC	2011	p, ионы	8500	7000
INSTN, Франция	SATURNE	1978	$p, d, \text{ионы}$	33.6	3
RAL, Англия	ISIS	1984	$p$	52	0.8
BNL, США	AGS	1960	p, ионы	256.9	30
	RHIC	2001	p, ионы	121	$p: 140, Au: 100$
Fermilab, США	MainRing.	1972	$p$	2000	150
ИФВЭ, Россия	У-70	1967	$p$	473	70
ОИЯИ, Россия	Нуклотрон	2000	$p, d, \text{ионы}$	60	6
DESY, Германия	PETRA II	1987	$e^+, e^-, p$	733.4	$e: 14, p: 40$
КЕК, Япония	J-PARC	2012	$p$	500	50

Количество центров, имеющих источники СИ

Страна	Количество центров	Страна	Количество центров
Австралия	1	Нидерланды	1
Армения	1	Польша	1
Бразилия	1	Россия	5
Великобритания	4	Сингапур	1
Германия	6	США	16
Дания	1	Таиланд	1
Индия	1	Тайвань	1
Испания	1	Украина	2
Италия	3	Франция	3
Иордания	1	Чехия	1
Иран	1	Швейцария	2
Канада	1	Швеция	1
Китай	3	Япония	13
Корея	1	Словения	1
Турция	1	Всего	<b>76</b>

1940-х гг. они стали постепенно делиться на ядерную физику, или физику атомного ядра, и физику элементарных частиц. В первом случае для исследований было достаточным применение ускорителей с энергией до 100 МэВ, во втором необходимые энергии сначала составляли порядка 1 ГэВ, затем требования к величине энергии ускорителей стали возрастать и в настоящее время достигли порядка ТэВ в системе центра масс. Причем в каждой из этих областей задачи становятся все сложнее.

В нашей стране и странах СНГ 9 ускорителей с энергией  $>1$  ГэВ, их характеристики представлены в табл. 1.4. Среди них два ускорителя на встречных пучках, действующих в Новосибирском институте ядерных исследований.

В мире в настоящее время действуют уникальные установки, основным элементом которых являются ускорители — лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Эти установки позволяют получать когерентное излучение в интервале от видимого света до жесткого рентгена. В мире таких установок пока только шесть (табл. 1.5), но у них большое будущее во всех отраслях мирового хозяйства.

Таблица 1.4

Действующие ускорители России и стран СНГ с энергией более 1 ГэВ

Научный центр	Название	Дата запуска	Частицы	Орбита, м	Энергия, ГэВ
ИФВЭ (Протвино)	У-70	1967	$p$	1485	70
	У-1.5	1985	$p$	99	1.351
ИТЭФ (Москва)	У-10	1961	$p, He^{2+}$	80	10
ЕрФИ (Ереван)	АРУС	1967	$e^-$	217	6.1
ОИЯИ (Дубна)	Нуклотрон	2000	$p$ , ионы	188	6
НИЦ «Курчатовский ин-т» (Москва)	Сибирь-2	1999	$e^-$	124	2.5
ХФТИ (Харьков)	ЛУЭ-2000	1965	$e^-$	250	2
ТПУ (Томск)	Сириус	1965	$e^-$	33	1.3
ИФП им. Ф.В. Лукина (Зеленоград)	Основной накопитель	2012	$e^-$	116	2.5
ИЯИ СО РАН (Новосибирск)	ВЭПП-4М	1992	$e^+ e^-$	366	6
	ВЭПП-2000	2006	$e^+ e^-$	24	1

Новосибирский ЛСЭ имеет три очереди (в таблице представлена третья очередь).

Только в Московском университете в фундаментальных исследованиях работает девять ускорителей электронов и протонов. По использованию ускорителей в фундаментальной науке наша страна отстает от ведущих стран мира незначительно.

Ниже мы приводим полные названия ускорителей:

- European XFEL — Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах;
- LCLS — Линейный источник когерентного света;
- LCLS-II CuRF — Линейный источник когерентного света-II;
- LCLS-II SCRF — Линейный источник когерентного света-II;
- SACLA — SPRing-8 компактный лазер на свободных электронах;
- SwissFEL — Швейцарский лазер на свободных электронах;
- PAL-XFEL — Лаборатория ускорителей Пхохан с рентгеновским лазером на свободных электронах;
- Новосибирский ЛСЭ — Новосибирский лазер на свободных электронах.

Действующие в мире лазеры на свободных электронах\*

Страна	Ввод	Вид ускорителя	$\nu$ , Гц	$\lambda_{\min}$ , нм	$E_{e \max}$ , ГэВ	$L$ , км	$N$
Германия	2016	холодный магнит	$27 \cdot 10^3$	0.05	17.5	3.4	3
США	2009	теплый магнит	120	0.15	14.3	3	1
США	2019	теплый магнит	120	0.05	15	3	–
США	2020	холодный магнит	$10^6$	0.25	5	3	–
Япония	2011	теплый магнит	60	0.08	8.5	0.75	3
Швейцария	2016	теплый магнит	100	0.1	5.8	0.74	1
Южная Корея	2016	теплый магнит	60	0.06	10	1.1	2
Россия	2013	холодный магнит	$3.8 \cdot 10^6$	5000	0.042	0.026	3

\* В таблице использованы следующие обозначения:  $\nu$  — частота повторения импульсов;  $\lambda_{\min}$  — минимальная длина волны лазера;  $E_{e \max}$  — максимальная энергия электронов;  $L$  — длина установки;  $N$  — количество ондуляторов.

## 1.1. Ускорители в ядерной физике

Исторически развитию ядерной физики предшествовало большое количество исследований в области физики атома. До открытия ядра исследования вещества привели к открытию проникающих излучений: Ю. Плюккером в 1859 г. были открыты катодные лучи, В. Рентгеном в 1895 г. — рентгеновские лучи, в 1896 г. А. Беккерелем — радиоактивность, а в 1897 г. Дж. Томсоном был открыт электрон.

Открытия целой плеяды великих ученых нашей цивилизации в конце XIX и первой половине XX в. позволили создать нынешнее ее лицо, которое просто немыслимо без ядерной физики. Именно цепь удивительных открытий первых двух десятилетий XX в. заставила задуматься о необходимости ускорения заряженных частиц. Используемые для этого приборы должны были стать главным орудием в исследованиях свойств и законов микромира.

Поэтому в сносках и тексте в настоящей монографии упоминаются многие ученые того времени и сделанные ими основные открытия.

Открытие радиоактивности можно считать рождением ядерной физики, поскольку обнаруженные лучи, как оказалось позднее, испускались не атомом, а ядром.

В ядерной физике интервал энергий, достаточный для проведения исследований, составляет от единиц до сотен МэВ<sup>8</sup>. При энергиях выше ~290 МэВ могут образовываться новые частицы —  $\pi$ -мезоны (их рождение при взаимодействии  $\gamma$ -квантов с ядрами (фоторождение) происходит при энергиях порядка 140 МэВ). Поэтому область энергий выше ~140 МэВ можно условно отнести к смешанной области — ядерной физики и физики элементарных частиц.

Развитие ядерной физики можно условно разделить на несколько временных интервалов. На первом этапе развития ядерной физики изучались открытые ранее проникающие излучения и их свойства.

В 1898 г. Мария и Пьер Кюри<sup>9</sup> выделили и изучили радиоактивность радия и полония. В 1899 г. Э. Резерфордом были открыты частицы, испускаемые образцом урана, помещенного в магнитное поле, — положительно заряженные  $\alpha$ -частицы и отрицательно заряженные  $\beta$ -частицы, а в 1900 г. П. Виллард<sup>10</sup> открыл  $\gamma$ -лучи. Позже  $\gamma$ -лучи стали использоваться для изучения строения вещества. В 1911 г. независимо друг от друга Фаянс<sup>11</sup> и Содди<sup>12</sup> установили,

<sup>8</sup> Ядерно-физические исследования, в зависимости от энергии используемых ускорителей, условно делятся на области с низкими энергиями — до 30 МэВ, средними — 30–100 МэВ, высокими — энергии до 1 ГэВ, сверхвысокими — выше 1 ГэВ. Требуемые в эксперименте энергии определяют тип необходимого для исследований ускорителя.

<sup>9</sup> **Пьер Кюри** (1859–1906) — французский ученый-физик, один из первых исследователей радиоактивности, член Французской академии наук, лауреат Нобелевской премии по физике за 1903 г. Муж Марии Склодовской-Кюри. Вместе со старшим братом Жаком открыл пьезоэлектрический эффект.

**Мария Склодовская-Кюри** (1867–1934). Родилась в Варшаве (Царство Польское, Российская империя). Французский и польский ученый-экспериментатор (физик, химик), педагог, общественный деятель. Она была членом 85 научных обществ всего мира. Открыла и исследовала радиоактивность урана, полония, тория и радия. В 1903 г. Пьеру и Марии Кюри присуждена Нобелевская премия по физике. М. Кюри также удостоена Нобелевской премии по химии в 1911 г.

<sup>10</sup> **Поль Ульриш Виллард** (1860–1934) — французский физик и химик. В 1900 г. при изучении радиоактивности открыл  $\gamma$ -лучи. Член Парижской академии с 1908 г. В 1881 г. окончил Высшую нормальную школу в Париже. Создал средства дозиметрии и первым в 1908 г. предложил для количественной оценки излучения использовать ионизационную камеру.

<sup>11</sup> **Казимир Фаянс** (1887–1975) — американский физикохимик. Поляк по происхождению. Фаянс одновременно с Ф. Содди установил в 1913 г. правило смещения при распаде радиоактивных элементов, открыл радиоактивные изотопы  $^{243m}\text{Pa}$  (UX2) и  $^{215}\text{Po}$  (AcA), двойной распад  $^{214}\text{Bi}$  (RaC), а также совместно с Ф. Панетом сформулировал в 1913 г. правило соосаждения радиоактивных элементов (правило Фаянса — Панета).

<sup>12</sup> **Фредерик Содди** (1877–1956). Родился в Истборне (Великобритания). Обучался в университете Аберистугита, а затем Оксфорда. Английский радиохимик, член Лондонского королевского общества (1910), лауреат Нобелевской премии по химии за 1921 г. Доказал совместно с Резер-

что при радиоактивном распаде происходят превращения элементов. Например, атом  $^{238}_{92}\text{U}$  при испускании  $\alpha$ -частицы превращается в атом  $^{234}_{90}\text{Th}$ . Ими же было установлено, что при некоторых цепочках распадов могут возникать одни и те же элементы с разными массами, которые они назвали изотопами.

Пьер Кюри в 1903 г. установил, что 1 г радия выделяет энергии больше, чем выделяется при сгорании или взрыве такого же количества химических соединений.

В 1911 г. Э. Резерфорд<sup>13</sup> в результате анализа выполненных в 1908 г. опытов его сотрудников Г. Гейгера и Э. Марсдена предложил планетарную модель атома с маленьким тяжелым ядром и вращающимися вокруг него электронами.

В 1912 г. физики научились видеть траектории заряженных частиц с помощью конденсационного пара. Чарльз Вильсон изобрел камеру, названную его именем.

Ученик Резерфорда Генри Мозли<sup>14</sup>, экспериментально исследуя характеристическое рентгеновское излучение различных атомов, в 1913 г. установил закон, согласно которому электрический заряд атомного ядра (в единицах абсолютной величины заряда электрона) равен порядковому номеру  $Z$  элемента в периодической таблице элементов Д. И. Менделеева. В это же время Нильс Бор развил модель атома Резерфорда, предложив квантовую теорию атома.

---

фордом, что гелий является продуктом испускания при распаде радия. Сформировал две очень важные идеи: идентичность химических свойств некоторых радиоактивных элементов (впоследствии названных изотопами) и теорию радиоактивного распада, описывающую движение по периодической таблице в результате испускания радиоактивным элементом  $\alpha$ - или  $\beta$ -лучей.

<sup>13</sup> **Эрнест Резерфорд** (1871–1937) — британский физик новозеландского происхождения. Основоположник ядерной физики. Лауреат Нобелевской премии по химии 1908 г. Один из самых известных и уважаемых ученых мира. Резерфорд родился в Новой Зеландии в небольшом поселке Спринг-Грув близ города Нельсона, в семье фермера, эмигрировавшей из г. Перт (Шотландия). Его магистерская работа, написанная в 1892 г., называлась «Магнетизация железа при высокочастотных разрядах». Работа касалась обнаружения радиоволн, существование которых было доказано в 1888 г. немецким физиком Генрихом Герцем. Резерфордом был придуман и изготовлен прибор — магнитный детектор, один из первых приемников электромагнитных волн. В 1895 г. Резерфорд прибывает в Англию в Кавендишскую лабораторию Кембриджского университета и становится первым докторантом ее директора Джозефа Джона Томсона. В 1898 г. Резерфорд открывает  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи. С 1898 г. ученый исследует только что открытое явление радиоактивности урана и тория. По предложению Томсона занимает должность профессора университета Макгилла в Монреале (Канада). В этом университете Резерфорд плодотворно сотрудничает с Ф. Содди. Весной 1907 г. он покидает Канаду и начинает профессорскую деятельность в Университете Виктории (ныне Манчестерский университет, Англия). В 1903 г. избран членом Лондонского Королевского общества. В 1908 г. Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ». В 1912 г. предложил планетарную модель атома, в 1919 г. открыл протон, впервые осуществив в ядерной реакции превращение одного химического элемента в другой. С 1925 по 1930 г. он занимал пост президента Лондонского Королевского общества. В 1931–1933 гг. Резерфорд был президентом Института Физики. Умер в 1937 г.

<sup>14</sup> **Генри Гвин Джефрис Мозли** (1887–1915) — английский физик, один из основоположников рентгеновской спектроскопии. Родился в английском городке Уэймут графства Дорсет. Окончил Тринити-колледж Оксфордского университета. Автор закона Мозли и первого радиоизотопного источника электрической энергии (атомной батареи). Погиб на фронте в 1915 г.

Оказалось, что под действием налетающих частиц происходит изменение состава ядра, так что ядро одного химического элемента может превратиться в ядро другого элемента. С этого момента начинается исследование ядра. Первая искусственная реакция под действием  $\alpha$ -частиц была осуществлена на азоте Э. Резерфордом в 1919 г.:



Эта реакция свидетельствовала о наличии протонов внутри ядра.

После создания в 1919 г. учеником Д. Томсона<sup>15</sup> Ф. Астоном<sup>16</sup> масс-спектрометра (принцип действия был предложен Томсоном в 1907 г.) началось высокоточное исследование масс ядер<sup>17</sup> и продуктов реакций, а также структуры ядра.

В 1922 г. А. Комптон<sup>18</sup> исследовал рассеяние рентгеновских лучей на электронах и доказал существование фотонов, а в 1923 г. Луи де Бройль предположил, что электрон может иметь волновые свойства. В 1927 г. К. Девиссон, Л. Джермер и Д. Томсон подтвердили экспериментально гипотезу де Бройля.

При бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами Ф. Жолио-Кюри<sup>19</sup> обнаружил нейтральное глубоко проникающее излучение, которое в 1932 г. Чедвик

<sup>15</sup> **Джозеф Джон Томсон** (1856–1940) — английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1906 г. с формулировкой «за исследования прохождения электричества через газы». Родился 18 декабря 1856 г. в Читем-Хилле вблизи Манчестера. В 1880 г. получил степень бакалавра. В 1914–1916 гг. Д. Томсон являлся президентом Лондонского общества физиков. В 1915–1920 гг. — президент Лондонского королевского общества. В 1997 г. открыл электрон, затем построил первую модель атома, в 1913 г. открыл существование изотопов.

<sup>16</sup> **Фрэнсис Уильям Астон** (1877–1945) — английский физик, член Лондонского королевского общества (1921), член-корреспондент АН СССР (1924), лауреат Нобелевской премии по химии 1922 г. Родился в городке Харборн (часть Бирмингема). Окончил Бирмингемский и Кембриджский университеты. С 1909 г. преподавал в Бирмингемском университете. С 1920 г. — член Тринити-колледжа Кембриджского университета. В 1913 г. Томсон и Астон впервые указали на существование стабильных изотопов у неона, а в 1919 г., сконструировав масс-спектрометр, Астон окончательно доказал существование двух изотопов — <sup>20</sup>Ne и <sup>22</sup>Ne.

<sup>17</sup> Астон измерил массы 213 стабильных изотопов различных элементов. Всего в настоящее время известны массы 265 стабильных изотопов и более 2000 естественных и искусственно изготавливаемых нестабильных изотопов.

<sup>18</sup> **А. Комптон** — американский физик. Родился в 1892 г. в Вустере (США, штат Огайо). В 1913 г. закончил Вустерский университет. В 1916 г. он защитил диссертацию. В 1921 г. предположил, что электрон может вращаться вокруг своей оси (т. е. имеет спин) и, по сути, представляет собой электромагнит. В 1922 г. обнаружил и дал теоретическое обоснование эффекту изменения длины волны рентгеновского излучения вследствие рассеяния его электронами вещества, чем доказал существование фотона. За это открытие Комптон был удостоен Нобелевской премии в 1927 г. (совместно с Ч.Т.Р. Вильсоном).

<sup>19</sup> **Фредерик Жолио-Кюри** (1900–1958) — французский физик и общественный деятель, один из основателей и лидеров Всемирного движения сторонников мира и Пагуошского движения ученых. В 1926 г. он женился на Ирен Кюри. В 1930 г. был удостоен докторского звания за исследование электрохимических свойств радиоактивного элемента полония. В 1931 г. супруги Жолио-Кюри обнаружили, что тонкая пластинка водородсодержащего вещества, расположенная между облученным бериллием или бором и детектором, увеличивает перво-

объяснил существованием нейтральных частиц (нейтронов) с массой почти равной массе протона. Супруги Ирен и Фредерик Жолио-Кюри при облучении  $\alpha$ -частицами алюминия обнаружили искусственную радиоактивность. В 1931 г. Зоммерфельдом была предложена теория тормозного излучения электронов, которая подтвердилась после создания ускорителей электронов и позволила на них получать пучки высокоэнергичных фотонов.

Эти открытия завершили первый этап развития ядерной физики, который проходил без использования ускорителей. Значимость этого этапа для физики ускорителей заключается в том, что в это время были разработаны и запущены некоторые типы высоковольтных и резонансных ускорителей: каскадный ускоритель<sup>20</sup> Кокрофта и Уолтона (1932), электростатический ускоритель Ван де Граафа<sup>21</sup> (1929), циклотрон<sup>22</sup> (1930), линейный ускоритель (1928). Они создавались с целью проведения исследований в ядерной физике<sup>23</sup> при более высоких энергиях, чем удавалось получать от естественных радиоактивных источников.

Второй этап развития исследований в ядерной физике (1932–1945) напрямую связан с развитием ускорительной техники, поскольку ранее энергии частиц из естественных радиоактивных источников не хватало для изучения внутренней структуры ядра. Возникающие при распаде радиоактивных элементов  $\alpha$ -частицы имеют энергию от 4 до 9 МэВ, чего было недостаточно для преодоления кулоновского отталкивания ядра и проникновения частицы внутрь многих ядер. Интересно было изучить и взаимодействие с ядрами других частиц, например фотонов. Применение  $\gamma$ -излучения из радиоактивных источников позволило проникнуть в ядро без кулоновского отталкивания. Однако в этом случае фото-

---

начальную радиацию почти вдвое. Жолио-Кюри обнаружили, что некоторые из подвергаемых анализу образцов алюминия и бора превратились в новые химические элементы. В 1935 г. Фредерику и Ирен Жолио-Кюри совместно была присуждена Нобелевская премия по химии «за выполненный синтез новых радиоактивных элементов». Жолио-Кюри был членом Французской академии наук и Медицинской академии Франции, а также иностранным членом многих научных обществ, в том числе АН СССР. В СССР Жолио-Кюри был удостоен Международной Сталинской премии «За укрепление мира между народами».

<sup>20</sup> Принципиальная схема умножителя данного типа была разработана в 1919 г. швейцарским физиком Генрихом Грейнахером. По этой причине каскадный удвоитель данного типа иногда называют *умножителем Грейнахера*. В 1932 г. Джон Кокрофт и Эрнст Уолтон построили умножитель для использования его в качестве высоковольтного источника напряжения в ускорителе заряженных частиц, предназначенного для проведения эксперимента по искусственному расщеплению атомных ядер (практически одновременно такой же эксперимент впервые в СССР был проведен в УФТИ). Умножитель напряжения обычно называют *генератором Кокрофта — Уолтона*.

<sup>21</sup> Генератор высокого напряжения, принцип действия которого основан на электризации движущейся диэлектрической ленты. Первый генератор был создан американским физиком Робертом Ван де Граафом в 1929 г. и позволял получать разность потенциалов до 80 кВ. В 1931 и 1933 гг. им же были построены более мощные генераторы, позволившие достичь напряжения в 1 и 7 МэВ соответственно.

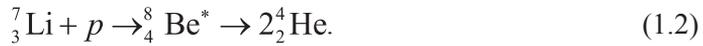
<sup>22</sup> Первый циклотрон был создан в 1930 г. американскими физиками Э. Лоуренсом и С. Линвингстоном. Это был маленький ускоритель 4-дюймового диаметра на энергию 80 кэВ. Он использовался для проверки принципов резонансного ускорения.

<sup>23</sup> Первым ускорителем условно можно считать рентгеновскую трубку, созданную в 1895 г.

ны имели дискретную энергию в виде отдельных значений в интервале до нескольких МэВ. Для проведения обширных исследований этого явно не хватало.

Поэтому уже в начале 1930-х гг. созданные ускорители были применены для исследований ядра.

Первый эксперимент на ускорителях был выполнен в 1932 г. на каскадном ускорителе, построенном Кокрофтом и Уолтоном в Кембридже. Протонами с энергией 380 кэВ было расщеплено ядро лития на две  $\alpha$ -частицы:



В 1934 г. под действием естественных  $\gamma$ -квантов Чедвиком<sup>24</sup> и Гольдхабером<sup>25</sup> осуществлена первая фотоядерная реакция расщепления ядер дейтерия:



В 1940 г. для получения пучков ускоренных электронов и высокоэнергичных фотонов и их применения для исследований в области ядерной физики Д. Керстом<sup>26</sup> был построен бетатрон на энергию 2.3 МэВ. Вскоре бетатрон также начал использоваться в промышленности и медицине.

Энергия большинства из построенных ускорителей составляла единицы МэВ. Поэтому созданную ускорительную технику приспособляли для проведения экспериментов, совершенствовали их конструкцию, работали над увеличением энергии и интенсивности пучка. У самого большого из них (циклотрона) энергия достигала 40 МэВ для  $\alpha$ -частиц и 20 МэВ для протонов.

В 1939 г. Э. Лоуренс был удостоен Нобелевской премии за изобретение и создание циклотрона, а также за полученные с его помощью результаты, особенно в отношении искусственных радиоактивных элементов.

<sup>24</sup> **Джеймс Чедвик** родился в 1891 г. в Боллингтоне (Чешир), умер в 1974 г. в Кембридже. Английский физик, известный по открытию нейтрона и фотоядерной реакции. Окончил Манчестерский и Кембриджский университеты. Ученик Э. Резерфорда. В 1920 г. экспериментально подтвердил равенство заряда ядра порядковому номеру элемента. В 1943–1945 гг. возглавлял группу английских ученых, работавших в Лос-Аламосской лаборатории (США) над проектом атомной бомбы. Член Лондонского королевского общества с 1927 г. Лауреат Нобелевской премии по физике 1935 г. «за открытие нейтрона». В 1950 г. награжден медалью Фарадея.

<sup>25</sup> **Морис Гольдхабер** (1911–2011) — американский физик-ядерщик. Автор открытия отрицательной спиральности нейтрино в 1957 г.

<sup>26</sup> **Дональд Вильям Керст** (1911–1993) — американский физик, создатель первого бетатрона, автор многих пионерских идей в физике ускорителей, а также работ в области ядерной физики, физики плазмы, медицинской физики. Родился в маленьком городке Галена, штат Иллинойс. В 1934 г. получил степень бакалавра, в 1937 г. защитил диссертацию в Иллинойском университете. Год работал в компании General Electric, затем с 1938 по 1958 г., став профессором, преподавал в Иллинойском университете. Описал поперечные колебания частиц в циклическом ускорителе, позднее названные бетатронными, изобрел принцип спиральной секторной фокусировки, предложил сталкивать протонные пучки для экспериментов по физике элементарных частиц.

До войны естественные источники частиц конкурировали с ускорителями. Одной из приоритетных задач ядерной физики этого периода было получение (синтез) новых элементов и изучение механизмов распада и взаимопревращения тяжелых ядер, поиск путей извлечения энергии ядер. В этих исследованиях использовались в основном естественные источники. В 1934 г. Ирен<sup>27</sup> и Фредерик Жолио-Кюри при бомбардировке  $\alpha$ -частицами алюминия впервые синтезировали искусственный радиоактивный фосфор <sup>30</sup>P,



В 1937 г. при облучении урана был синтезирован первый искусственный элемент — технеций. После того как Л. Сцилард<sup>28</sup> предсказал в 1934 г. возможность цепных реакций, широкие исследования были посвящены тяжелым ядрам. В 1938 г. немецкие физики Отто Ган<sup>29</sup> и Фриц Штрассман<sup>30</sup> открыли процесс деления ядер. В 1939 г. обнаружено деление урана с испусканием вторичных нейтронов, а в 1940 г. Г. Флёрвым<sup>31</sup> и К. Петржаком<sup>32</sup> — спонтанное деление <sup>235</sup>U.

<sup>27</sup> **Ирен Жолио-Кюри** (1897–1956) — французский физик, старшая дочь Марии Склодовской-Кюри и Пьера Кюри, жена Фредерика Жолио-Кюри. Получила образование в Парижском университете (Сорбонне). В 1925 г. Ирен Кюри была присуждена докторская степень. В 1935 г. Ирен Жолио-Кюри и Фредерику Жолио совместно была присуждена Нобелевская премия по химии «за выполненный синтез новых радиоактивных элементов».

<sup>28</sup> **Лео Сцилард** (1898–1964) — американский физик венгерско-еврейского происхождения. Родился в Будапеште в 1898 г. В 1916 г. получил национальную премию Этвёша в области математики. В 1916 г. поступил на инженерный факультет Будапештского технического университета. В 1923 г. ему была присуждена докторская степень по физике в Берлинском университете им. Гумбольдта. В 1928 г. предложил идею линейного резонансного ускорителя. В 1929 г. заполнил патент на идею циклотрона. В 1934 г. предложил принцип автофазировки, лежащий в основе технологии современных ускорителей обнаружил эффект разрушения химической связи под действием нейтронов, который получил известность как эффект Сциларда — Чалмерса. В 1939 г. обосновал возможность развития в уране самоподдерживающейся ядерной реакции при делении ядер урана. Доказал, что в процессе деления ядер урана излучаются вторичные нейтроны.

<sup>29</sup> **Отто Ган** родился 8 марта 1879 г. в Франкфурте-на-Майне. Немецкий химик, ученый-новатор в области радиохимии, открывший ядерную изомерию и расщепление урана. В 1907 г. Ган защитил в Берлине докторскую диссертацию и получил право работать профессором. В 1924 г. Ган стал полноправным членом Прусской академии наук. Он один из основателей ядерной химии. Когда Отто Ган и Фриц Штрассман в 1938 г. при поиске трансуранов облучали уран нейтронами, они нашли следы бария. Эксперимент с фракционированием радия, бария и мезотория привел Гана к заключению, что ядро урана распадается на более легкие элементы. Так было открыто расщепление ядра. Лауреат Нобелевской премии по химии 1944 г. Умер 28 июля 1968 г. в Гёттингене.

<sup>30</sup> **Фриц Штрассман** (1902–1980) — немецкий химик и физик. В 1924 г. окончил Ганноверскую высшую техническую школу. Профессор Майнцского университета (1946–1970), в 1946–1952 гг. являлся директором Института неорганической и ядерной химии.

<sup>31</sup> **Георгий Николаевич Флёрв** (1913–1990) — советский физик-ядерщик. Родился в Ростове. Окончил инженерно-физический факультет Ленинградского Индустриального института им. М. И. Калинина. Ученик Курчатова, участник атомного проекта. Один из отцов-основателей Объединенного института ядерных исследований в Дубне, академик АН СССР с 1968 г., Герой Социалистического Труда. Лауреат Ленинской премии, дважды лауреат Сталинской премии. Открыл новый тип радиоактивных превращений — спонтанное деление ядер урана. Под его руководством открыты 103-й, 104-й, 105-й, 106-й элементы периодической таблицы Менделеева.

<sup>32</sup> **Константин Антонович Петржак** (1907–1998) — советский физик, доктор физико-математических наук, профессор — один из основателей советской экспериментальной ядерной

В 1939 г. Макмиллан<sup>33</sup> синтезировал нептуний. Начиная с 1940 г. Г. Сиборг<sup>34</sup> синтезировал ряд трансурановых элементов: плутоний, нептуний, америций, кюрий, берклий, калифорний, эйнштейний, фермий. Элементы  ${}^{243}_{93}\text{Bk}$ ,  ${}^{245}_{98}\text{Cf}$ ,  ${}^{246}_{98}\text{Cf}$ ,  ${}^{248}_{99}\text{Es}$ ,  ${}^{250}_{100}\text{Fm}$  были получены в Беркли позднее, в 1949–1950 гг., при использовании циклотрона с энергией 35 МэВ, на котором ускорялись  $\alpha$ -частицы, ядра углерода и кислорода.

При анализе данных экспериментов о рассеянии протонов и  $\alpha$ -частиц, а также при рассеянии быстрых нейтронов ядрами были измерены размеры ядер, которые изменяются от  $2 \cdot 10^{-13}$  см для легчайших ядер до  $9 \cdot 10^{-13}$  см для урана. Для этих целей использовали высоковольтные ускорители, на которых ускорялись протоны и получали пучки вторичных нейтронов, а также естественные источники частиц.

При анализе результатов экспериментов на ускорителях Г. Брейтом<sup>35</sup>, Э. Кондоном<sup>36</sup> и Р. Презентом была предложена гипотеза о зарядовой независимости ядерных сил. Измерения энергии связи ядер показали, что с учетом кулоновского взаимодействия протонов в ядре энергии связи ядер  ${}^3\text{He}$  и  ${}^3\text{H}$  совпадают.

---

физики. Родился 4 сентября 1907 г. в уездном городе Луков (ныне — город Лукув, Люблинское воеводство, Польша). Участник советского атомного проекта. Дважды лауреат Сталинской премии. В 1940 г. вместе с Г. Н. Флёрвым сделал фундаментальное открытие, принесшее авторам мировую известность: было обнаружено новое физическое явление — спонтанное деление ядер урана-235.

<sup>33</sup> **Эдвин Маттисон Макмиллан** (1907–1991) — американский физик и химик. Родился 18 сентября 1907 г. в Редондо Бич (Калифорния). В 1932 г. защитил докторскую диссертацию в Принстонском университете под руководством Э. Кондона. Внес значительный вклад в химию трансурановых элементов. Открыл принцип автофазировки. Создал первый электронный синхротрон, синхроциклотрон. Руководил Национальной лабораторией им. Лоуренса в 1958–1973 гг. Лауреат Нобелевской премии по химии 1951 г. (совместно с Г. Сиборгом) «за открытие нептуния (с Абельсоном) и плутония (с Кеннеди, Сиборгом и Валем)».

<sup>34</sup> **Гленн Теодор Сиборг** (19.04.1912–25.02.1999) — американский химик и физик-ядерщик. Родился в Ишпеминге, штат Мичиган. В 1934 г. окончил университет в Лос-Анджелесе, получив степень бакалавра. В 1937 г. ему была присуждена докторская степень по химии. Благодаря его работам окончательно сформировалась новая наука — ядерная химия. Лауреат Нобелевской премии по химии 1951 г. «за открытия в области химии трансурановых элементов» совместно с Э. Макмилланом. В 1942 г. был участником Манхэттенского проекта. С 1961 по 1971 г. Сиборг — председатель Комиссии по атомной энергии США.

<sup>35</sup> **Грегори Брейт** (Григорий Альфредович Брейт-Шнайдер (14.07.1899–11.09.1981), США) — американский физик, член Национальной академии наук США (1939). Родился в Николаеве (Российская империя, ныне Украина) в семье книгоиздателя. Разработал теорию процесса рождения электрон-позитронной пары при столкновении двух фотонов. В 1936 г. обратил внимание на эквивалентность протон-протонных и протон-нейтронных взаимодействий, что привело к идее изотопической инвариантности ядерных сил (совместно с Э. Кондоном и Р. Презентом). Создал теорию рассеяния протонов на протонах (совместно с Э. Кондоном).

<sup>36</sup> **Эдвард Улер Кондон** (1902–1974) — американский физик-ядерщик. Один из участников разработки и развития квантовой механики. Участвовал в разработке ядерного оружия во время Второй Мировой войны в рамках Манхэттенского проекта. Участвовал в разработке радиолокационных станций. С августа 1943 по февраль 1945 г. Кондон работал в Беркли над разделением U-235 и U-238. В 1944 г. Кондон был избран в Национальную академию наук. Директор Национального института стандартов и технологий (НИСТ) с 1945 по 1951 г. С 1946 г. президент Американского физического общества.

Когда достигнутая на ускорителях энергия частиц составила порядка 10 МэВ, была измерена энергия связи нуклонов в ядрах, которая оказалась примерно в  $10^6$  раз больше, чем в атоме, и составила 7–9 МэВ на один нуклон. Далее была установлена зависимость энергии связи от атомного номера ядра. В экспериментах были измерены пороги ядерных реакций, уровни возбуждения ядер, установлен нецентральный характер ядерных сил. Например, исследования связанных состояний протона и нейтрона в дейтроне при энергиях в единицы МэВ позволили установить, что основное состояние дейтрона представляет собой суперпозицию состояний с орбитальными моментами  $l = 0$  и  $l = 2$ . Причиной этого является нецентральный характер ядерных сил.

На высоковольтных ускорителях протонов и циклотронах изучены другие свойства ядерных сил, исследован и измерен их радиус действия ( $10^{-13}$  см), а также зависимость ядерных сил от спина частиц. Оказалось, что в результате взаимодействия протонов с ядрами может происходить обмен зарядами налетающих протонов и нейтронов ядра, то есть ядерные силы носят обменный характер.

Это означает, что они обусловлены (по крайней мере, частично) обменом третьей частицей,  $\pi$ -мезоном. Такую гипотезу высказали в 1934 г. И. Тамм<sup>37</sup> и в 1935 г. — Х. Юкава<sup>38</sup> по аналогии с принятым в квантовой электродинамике представлением о взаимодействии между электрическими зарядами. Взаимодействие между зарядами осуществляется через электромагнитное поле, которое может быть представлено как совокупность квантов энергии — фотонов. Каждый заряд создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Процесс взаимодействия между зарядами заключается в обмене виртуальными фотонами. В квантовой механике виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время их существования.

---

<sup>37</sup> **Игорь Евгеньевич Тамм** (1895–1971) — советский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике 1958 г. (совместно с П. А. Черенковым и И. М. Франком). Герой Социалистического Труда (1954). Лауреат двух Сталинских премий. Родился во Владивостоке; с 1922 г. и до конца карьеры его деятельность протекает в Москве. В течение многих лет он руководит кафедрой теоретической физики физфака МГУ. Участник атомного проекта, один из создателей первой советской атомной бомбы. Участвовал в теоретических исследованиях ударной волны большой интенсивности. Разработал принципы, позволившие создать первую термоядерную бомбу. С 1953 г. — академик АН СССР. Им описано движение частиц в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде (формула Франка — Тамма). Совместно с А. Д. Сахаровым разработал принципы удержания плазмы в токамаке.

<sup>38</sup> **Хидэки Юкава** (1907–1981) — японский физик-теоретик. В 1935 г. выдвинул гипотезу о существовании нового типа элементарных частиц с массой, промежуточной между массами электрона и протона. К концу 1040-х гг. эта гипотеза была подтверждена. В 1949 г. за предсказание существования мезонов теоретические исследования природы ядерных сил Юкава был удостоен Нобелевской премии по физике. Член Японской академии наук (1946), Папской академии наук (1961), иностранный член Лондонского королевского общества (1963), Академии наук СССР (1966).

На этом этапе исследований ядра было предложено много теорий и моделей, описывающих процессы в ядре и при взаимодействии с ним частиц. Одним из важнейших достижений теории ядра начала 1930-х гг. было создание в 1933 г. В. Гейзенбергом<sup>39</sup> и Д. Иваненко<sup>40</sup> протон-нейтронной модели. Эта модель остается общепринятой и в настоящее время.

Спустя некоторое время были измерены энергии связи большого количества ядер, которые достаточно хорошо описывались полуэмпирической формулой Вайцзекера<sup>41</sup>.

Кроме того, в 1934 г. Э. Ферми была разработана теория  $\beta$ -распада и нового вида взаимодействия, получившего название слабого; были предсказаны кванты сильного взаимодействия —  $\pi$ -мезоны (Х. Юкава, 1935); предложена капельная модель ядра (Н. Бор<sup>42</sup>, Я. Френкель<sup>43</sup>, 1936).

Нильс Бор, анализируя данные ядерных реакций, в 1936 г. создал теорию составного (компаунд) ядра, которое возникает, если время жизни ядра после попадания в него частицы велико по сравнению с ядерным временем:

<sup>39</sup> **Вернер Карл Гейзенберг** (1901–1976) — немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике 1932 г. Является автором ряда фундаментальных результатов в квантовой теории: заложил основы матричной механики, сформулировал соотношение неопределенностей, применил формализм квантовой механики к проблемам ферромагнетизма. Автор одной из первых квантово-механических теорий ядерных сил. Активно участвовал в развитии квантовой электродинамики и квантовой теории поля. Был ведущим теоретиком немецкой ядерной программы.

<sup>40</sup> **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904–1994). Родился в Полтаве. Российский и советский физик-теоретик. Поступил в Харьковский университет, после первого курса был переведен в ЛГУ, который окончил в 1927 г. Первым в 1932 г. предложил протон-нейтронную модель ядра, впоследствии развивавшуюся Вернером Гейзенбергом. Разработал в 1932 г. оболочечную модель атомных ядер. В 1944 г. совместно с И. Я. Померанчуком предсказал синхротронное излучение. В 1948 г. совместно с А. А. Соколовым разработал классическую теорию синхротронного излучения. Лауреат Сталинской премии. С 1943 г. до последних дней — профессор кафедры теоретической физики физического факультета МГУ.

<sup>41</sup> **Карл Фридрих фон Вайцзекер** (1912–2007) — немецкий физик и философ. Получил полуэмпирическую формулу для энергии связи атомного ядра, которую назвали в его честь формулой Вайцзекера. В 1942–1944 гг. был профессором теоретической физики в Страссбурге. В годы Второй мировой войны — участник немецкого «Уранового проекта». С 1970 г. — директор Института физики Общества Макса Планка.

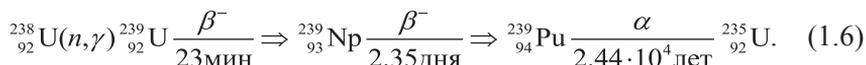
<sup>42</sup> **Нильс Хенрик Давид Бор** (1885–1962) — датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике 1922 г. Член Датского королевского общества (1917) и его президент с 1939 г. Был членом более чем 20 академий наук мира, в том числе иностранным почетным членом АН СССР. Бор известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики. Внес значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой. Предположил существование так называемого составного ядра («компаунд-ядра»). Его идеи о поляризуемости и деформациях ядер были положены в основу обобщенной (коллективной) модели ядра.

<sup>43</sup> **Яков Ильич Френкель** (1894–1952) — советский ученый, физик-теоретик. Родился в Ростове-на-Дону. В 1913 г. поступил в Петербургский университет. С 1921 г. и до конца своей жизни Френкель работал в Ленинградском физико-техническом институте. Автор первого курса теоретической физики в СССР. Член-корреспондент АН СССР. Лауреат Сталинской премии.



а впоследствии распадается на остаточное ядро  $B$  и частицу  $b$ .

Для создания ядерного оружия необходимо было наработать ядерное топливо, позволяющее реализовать цепную ядерную реакцию. В этой связи на ускорителях (потоки нейтронов для этих целей получали, как правило, на циклотронах) исследовались реакции с образованием трансурановых элементов. В реакциях этого типа получали ядерное топливо:



В данной реакции в качестве ядерного топлива мог быть использован плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  либо уран  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , ядра которых при попадании в них медленного нейтрона распадаются с испусканием 2–3 нейтронов.

В научных и прикладных исследованиях этого периода стали использовать каскадные и электростатические высоковольтные ускорители, линейные ускорители, циклотроны и бетатроны. Они постепенно стали основным инструментом в исследовании ядер. Однако для расширения исследований различных характеристик ядра было недостаточно получаемых на ускорителях энергий и интенсивности пучков частиц.

Основной практический итог развития ядерной физики в этот период связан с созданием первого ядерного реактора и ядерной бомбы. Возникли ядерная энергетика и промышленность, началась разработка проектов по строительству атомных электростанций.

Для дальнейших исследований свойств ядерных сил необходимо было повысить энергию ускоряемых частиц.

Третий период развития ядерно-физических исследований условно продолжался с 1944 г. до 1990-х гг. Его начало связано, во-первых, с открытием принципа автофазировки В. И. Векслером<sup>44</sup>, а затем и сильной фокусировки, что позволило значительно увеличить энергии и интенсивности получаемых пучков частиц в действующих ускорителях. Во-вторых, развитие во время войны СВЧ-техники позволило усовершенствовать электронные приборы (клизотроны и магнетроны), применение которых в ускорителях позволило

<sup>44</sup> **Владимир Иосифович Векслер** (1907–1966). Родился в Житомире, Волынской губернии. Окончил Московский энергетический институт (1931). Советский физик-экспериментатор, основоположник ускорительной техники в СССР, создатель синхрофазотрона ОИЯИ. Академик АН СССР с 1958 г. Автор принципа автофазировки (1944); в 1945 г. независимо сформулированного Макмилланом. Автофазировка обеспечивает стабильность пучка частиц в резонансном ускорителе в продольном направлении. Открытие позволило создавать синхроциклотроны (фазотроны), а позже синхротроны для ускорения заряженных частиц. Второе открытие им сделано в 1960 г.— частицы «антисигма-минус-гиперон». Автор метода коллективного ускорения с помощью плазмы. Лауреат Ленинской и Сталинской премий.

значительно увеличить темп ускорения частиц. В-третьих, усовершенствовались технологии конструирования действующих типов ускорителей. Применение в экспериментах ускорителей в этот период существенно превысило использование радиоактивных источников. Появляются новые модели ускорительной техники — микротроны, изохронные циклотроны, фазотроны, синхротроны. Энергии последних превысили 1 ГэВ. Значительно возрастают энергии и интенсивности линейных ускорителей. Токи пучков линейных ускорителей возросли до единиц миллиампер.

Эти достижения позволили с помощью ускоренных пучков заряженных частиц измерить с высокой точностью угловые распределения, спектры, выходы различных частиц, сечения ядерных реакций. Из анализа экспериментальных данных получены сведения об энергетических уровнях ядер — их спинах, изотопических спинах, четностях. Проведены измерения размеров и формы ядер. В результате анализа экспериментальных данных установлены схемы распада ядер с различных уровней.

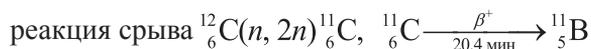
Продолжилось изучение свойств ядерных сил в широком энергетическом интервале до сотен МэВ. На ускорителях высоких энергий: изохронных циклотронах, фазотронах, линейных ускорителях — подтвержден обменный характер ядерных сил в результате нейтрон-протонного рассеяния. Было установлено, что под действием этих сил нуклоны могут обмениваться своими характеристиками — не только зарядами, но и проекциями спинов и т. д.

Взаимодействие ускоренных частиц с ядрами приводит к возникновению новых частиц и ядер. В ядерной физике изучение ядерных реакций — наиболее широкая область применения всех видов ускорительной техники.

Исследования на ускорителях показали, что во всех ядерных реакциях, помимо энергии и импульса, сохраняется момент количества движения, барионный ( $B$ ) и электрический ( $Q$ ) заряды, а также четность (кроме случаев  $\beta$ -распада ядер).

Широкие исследования ядерных реакций позволили их классифицировать. Ядерные реакции были классифицированы в зависимости от типа частиц, взаимодействующих с ядрами следующим образом:

- на реакции под действием тяжелых заряженных частиц — протонов и  $\alpha$ -частиц, например:  ${}_{5}^{11}\text{B}(p, n){}_{6}^{11}\text{C}$  или  ${}_{13}^{27}\text{Al}(\alpha, p){}_{14}^{30}\text{Si}$ ;
- реакции прямого действия (без образования промежуточного ядра), например:  ${}_{1}^{2}\text{H}(d, n){}_{2}^{4}\text{He}$ ;
- реакции срыва и подхвата, например:



- электроядерные и фотоядерные реакции, например:

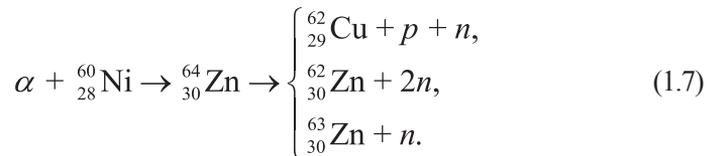


- реакции под действием тяжелых ионов, например:  ${}_{6}^{12}\text{C}({}_{8}^{16}\text{O}, \alpha){}_{12}^{24}\text{Mg}$ ;
- термоядерные реакции, например:  ${}_{1}^3\text{H}(d, n){}_2^4\text{He} + 17.6 \text{ МэВ}$ ;
- реакции на тяжелых ядрах, реакции под действием нейтронов.

Механизмы взаимопревращения ядер исследовались на разных типах ускорителей. Обширные исследования установили, что одни реакции идут с образованием промежуточного ядра, в других происходит взаимодействие с отдельным нуклоном (реакции прямого действия), в третьих — взаимодействие с группой нуклонов (кластером).

Измерение сечений ядерных реакций было выполнено на реакторах и ускорителях электронов, протонов и ионов с энергиями до нескольких десятков МэВ (30–50 МэВ).

Анализ результатов экспериментов при энергиях ускоренных частиц до 50 МэВ позволил описать возможные каналы распада ядер в результате взаимодействия, например:



Исследование на ускорителях электронов легких элементов в ядерных реакциях показало, что, например, легкие ядра  ${}_{3}^6\text{Li}$  имеют  $\alpha$ -кластерную структуру  $\alpha + t$  и  $\alpha + d$  соответственно. Низкая энергия связи между кластерами и остальными нуклонами ядра приводит к их легкому разделению в ядерных реакциях. Примером такой реакции является реакция под действием фотонов:

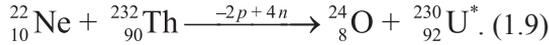


где  $\gamma$ -квант может взаимодействовать как с  $d$ , так и с  $\alpha$ -кластером внутри ядра  ${}_3^6\text{Li}$ .

Для ускорения тяжелых ионов переоборудовались уже действующие линейные ускорители, циклотроны, фазотроны и синхрофазотроны. Создавались ускорители и специально для этих целей. Энергии этих ускорителей, которые получили название нуклотронов, составляли от 10 МэВ до нескольких ГэВ на нуклон. На них до релятивистских энергий можно ускорить тяжелые ионы (дейтроны, ядра гелия, углерод, кислород, неон, кремний). Если протоны на синхрофазотроне в Дубне ускорялись до 10 ГэВ, то для вновь построенного в этом же здании нуклотроне энергия ядер неона составляла 100 ГэВ

(4 ГэВ/нуклон). В Беркли в 1980 г. достигли темпа ускорения 2 ГэВ/нуклон, а на линейном ускорителе в Дармштадте в 1976 г. 10–14 ГэВ/нуклон.

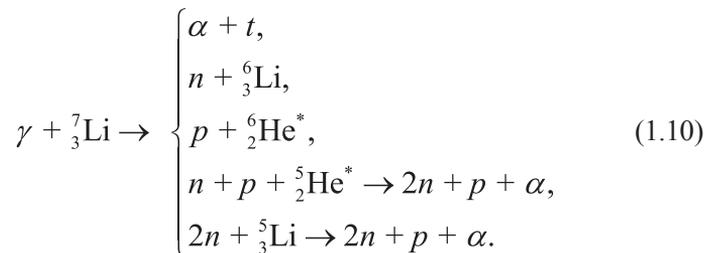
В ядерных реакциях на ускорителях тяжелых ионов — нуклотронах осуществляется превращение элементов, например  $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p)^{18}\text{F}$  или  $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha)^{15}\text{O}$ . На них осуществляется синтез тяжелых элементов, например:



Физикам удалось синтезировать на нуклотронах ядра многих не существующих в природе трансурановых элементов (вплоть до 118-го).

Примерами физических задач, решаемых с использованием пучков релятивистских частиц (которые моделируют пучки частиц, перемещающиеся во Вселенной), являются: исследование реакций, описывающих известную распространенность элементов во Вселенной; исследование ядерных процессов, происходящих в звездах; изучение радиационного облучения релятивистскими тяжелыми ионами космических аппаратов; изучение многокварковых систем, которые могут возникать при слиянии тяжелых ядер; получение сверхтяжелых ядер в области острова стабильности.

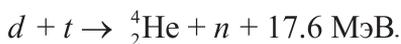
С созданием бетатронов, микротронов, линейных ускорителей и электронных синхротронов связаны развитие и достижения в исследовании фотоядерных реакций. На этих ускорителях с максимальными энергиями 20–50 МэВ проведены измерения сечений фотоядерных реакций в зависимости от энергии  $\gamma$ -квантов на большинстве стабильных ядер. В результате этих измерений был открыт и изучен гигантский дипольный резонанс, наблюдающийся при энергиях фотонов 10–25 МэВ; были построены модели ядра, описывающие гигантский дипольный резонанс (ГДР); открыто конфигурационное расщепление ядер. На квазимонохроматических пучках  $\gamma$ -квантов, получаемых на линейных ускорителях, исследована структура его сечений, а также парциальные каналы реакций, например:



При взаимодействии высокоэнергетических фотонов с ядрами сечения составляют от единиц до десятков миллибарн. Сечения и выходы фотоядерных реакций измерены в интервале энергий от порогов реакций до 16 ГэВ.

В 1958 г. немецким физиком Мёссбауэром был открыт сверхточный метод измерения энергии фотонов, получивший название эффекта Мёссбауэра<sup>45</sup>. Его энергетическое разрешение достигло сверхвысокого значения  $10^{-11}$ .

Сильноточные ускорители на низкие энергии порядка десятков и сотен кэВ широко используются в исследованиях физики плазмы. С их помощью получают потоки ионов, энергия которых достаточна для возникновения термоядерной реакции, например:



Пучки частиц двигаются по спиральным траекториям вокруг силовых линий магнитного поля, имеющих форму, близкую к окружности. На траектории они удерживаются магнитным полем в токамаках. Токамак представляет собой также низкоэнергетическую ускорительную установку с энергией  $E = 100 \text{ эВ} - 100 \text{ кэВ}$  и очень высоким током пучка (до 800 кА). В них удерживающее магнитное поле составляет 5–5.5 Тл. Основная исследуемая проблема — удержание плазмы в шнуре в течение длительного времени, пока не начнется самоподдерживающаяся термоядерная реакция.

В одном из подходов к созданию условий для начала термоядерной реакции использовалось 48 пучков электронов с энергией 2.5 МэВ (при силе тока 400 кА и длительности импульса  $6 \cdot 10^{-8}$  с) из установки «Ангара-5», направленных в одну точку, где располагался кубик из дейтерий-тритиевой смеси.

В 1962 г. на нуклотроне при облучении никелевой фольги ионами  ${}^{20}\text{Ne}$  был открыт распад ядра с испусканием протонов. А в 1980 г. на циклотроне в Беркли ионами  ${}^3\text{He}$  с энергией 110 МэВ при облучении ядер  ${}^{24}\text{Mg}$  был обнаружен двойной протонный распад.

На ускорителях исследованы механизмы взаимодействия различных частиц (протонов, ионов, электронов, фотонов и нейтронов) с веществом. В таких экспериментах изучено упругое и неупругое взаимодействие частиц с ядрами, процесс ионизации вещества, многократное рассеяние тяжелых заряженных частиц, образование вторичных электронов в результате взаимодействия частиц со средой (распределение электронов в зависимости от их энергии и числа), фотоэффект, комптоновское и обратное комптоновское рассеяние фотонов, механизм рождения электрон-позитронных пар, соотношение различных механизмов взаимодействия при разных энергиях частиц, скорость

<sup>45</sup> **Рудольф Людвиг Мёссбауэр** (1929–2011) — немецкий физик, специалист в физике атомного ядра и элементарных частиц. Окончил Технический институт Мюнхена. В 1955 г. стал магистром, а в 1958 г. доктором. В 1961 г. Мёссбауэр получил должность профессора физики в Калифорнийском технологическом институте. В 1961 г. Мёссбауэр получил Нобелевскую премию «за исследования в области резонансного поглощения  $\gamma$ -излучения и открытия эффекта, носящего его имя». Иностраный член АН СССР.

передачи энергии веществу. Результаты экспериментов по изучению ядерных реакций собраны в базы данных МАГАТЭ.

Огромную роль в атомной промышленности играют исследования взаимодействия нейтронов с веществом в связи с высокой проникающей способностью нейтронов по сравнению с любыми заряженными частицами.

Результаты экспериментов по изучению ядерных реакций под действием нейтронов широко используются при строительстве и обеспечении безопасности атомных станций. На их основе разрабатываются новые принципы работы реакторов. Наибольшее прикладное значение имеют реакции на тепловых нейтронах со средней энергией 0.025 эВ. Сечение взаимодействия таких нейтронов порядка 1 барн. Однако на некоторых ядрах в области разрешенных резонансов сечения достигают  $10^5$ – $10^6$  барн. Величины этих сечений сильно зависят от энергии нейтронов. Источником тепловых нейтронов является реактор, в котором плотность потока нейтронов значительно интенсивнее, чем на ускорителях.

Важную роль в ядерной физике играет изучение взаимодействия протонов и ионов с веществом. Например, на циклотроне НИИЯФ МГУ при прохождении протонов и ионов через кристаллы был открыт эффект теней<sup>46</sup>. Последующие исследования показали, что пробеги ионов в кристаллах оказываются большими, чем при прохождении аморфных сред (это явление получило название эффекта каналирования). Заряженные частицы в кристаллах двигаются как бы между двумя плоскостями и, отражаясь от них, проходят большее расстояние, чем в аморфном веществе, где потери энергии частицами одинаковы во всех направлениях.

Накопление этих данных позволило понять, как внутри ядра действуют принципы квантовой механики и как формируются энергетические состояния ядер. На основании этого удалось построить различные модели ядер: коллективную (Вайцзеккер), одночастичную (Гейзенберг, Иваненко), обобщенную, модель ферми-газа и другие. К сожалению, ни одна из моделей не описывает свойств всех ядер, а эффективно работает лишь для какой-либо группы ядер или описывает отдельные характеристики ядер в некотором диапазоне атомных чисел, зарядов и энергий.

Четвертый период использования ускорителей для ядерно-физических исследований начинается с 1990-х гг. и продолжается по настоящее время. Для него характерно относительное уменьшение числа исследований в области фундаментальной физики и возрастание числа прикладных задач в различных областях науки, промышленности, сельского хозяйства и медицины.

Для дальнейших фундаментальных исследований ведутся исследования о возможностях получения монохроматичных пучков частиц высоких энергий,

---

<sup>46</sup> Этот эффект был открыт сотрудником НИИЯФ МГУ А. Ф. Тулиновым, в дальнейшем профессора, заведующего кафедрой физического факультета.

например фотонов. С этой целью на основе линейных ускорителей и синхротронов с энергией порядка ГэВ созданы лазеры на свободных электронах.

Применение ускорителей средних энергий сохранит свою актуальность и в будущем. Они эффективны в ускорительной масс-спектропии небольших концентраций изотопов в геологии, археологии; для ионной имплантации в физике наноструктур и исследования локализаций отдельных атомов в кристаллической решетке; в ядерной астрофизике для исследования механизмов образования химических элементов во Вселенной; в ядерной биологии и медицине; в космическом материаловедении; в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза; в обеспечении контроля и безопасности населения; в оборонных технологиях, а также при развитии современных технологий во многих других отраслях народного хозяйства.

В фундаментальной науке к настоящему времени осталось работать около 2.5% всех действующих ускорителей. Подавляющая их часть действует в промышленности (61%), сельском хозяйстве и стерилизации (3.5%) и медицине (33%).

## 1.2. Ускорители в физике элементарных частиц

В области физики элементарных частиц исследования могут осуществляться с использованием как космических лучей, так и ускорителей. В космических лучах присутствуют частицы определенного типа и энергий, что сужает область исследуемых задач. Преимущество использования космических лучей по сравнению с ускорителями заключается в том, что в них присутствуют частицы с энергиями, недостижимыми на ускорителях (до  $10^{19}$  эВ). Однако их интенсивность низка, что требует проведения очень длительных экспериментов. Поэтому в физике элементарных частиц основная часть исследований осуществляется на ускорителях высоких энергий, в большей степени это электронные и протонные синхротроны, а также линейные ускорители (некоторые эксперименты проводятся на фазотронах и изохронных циклотронах). Особенно эффективны большие ускорительно-накопительные комплексы (УНК). Как правило, в их состав входит несколько ускорителей различных типов. В качестве инжекторов работают высоковольтные или линейные ускорители. На следующем этапе ускорение происходит в линейных ускорителях или синхротронах. Промежуточные кольца (бустеры) — это тоже синхротроны на невысокие энергии, использующие «теплые магниты». После бустеров используют большие синхротроны, которых в зависимости от конечной энергии частиц, достигаемой в комплексе, может быть несколько. Для получения встречных пучков они включают в себя накопительные кольца, в которых частицы могут накапливаться либо без ускорения, либо с небольшим дальнейшим ускорением. Последние

работают как синхротроны. В табл. 1.1 приведены основные параметры некоторых крупнейших в мире ускорительно-накопительных комплексов, на которых проводятся экспериментальные исследования в физике элементарных частиц. Как видно из таблицы, таких ускорительных комплексов немного, но это очень дорогостоящие сооружения.

В физике элементарных частиц на ускорителях высоких энергий, как правило линейных ускорителях, синхротронах и УНК, открыто большинство из известных в настоящее время элементарных частиц (адронов, мезонов) и их античастиц, а также целый ряд резонансов. Были измерены характеристики элементарных частиц: электрические заряды, массы, барионные заряды, лептонные числа, четности, спины.

Историю применения ускорительной техники в физике элементарных частиц (их открытие, изучение свойств, а также проверка моделей, разрабатываемых в этой области исследований) можно, как и использование ускорителей в ядерно-физических исследованиях, условно разделить на несколько этапов.

На первом этапе до 1932 г. исследования выполнялись без использования для этих целей ускорителей (с помощью катодных лучей, с использованием естественных радиоактивных источников и в процессе изучения  $\beta$ -распада). В это время были открыты четыре элементарные частицы — электрон, протон, нейтрон, фотон<sup>47</sup>. Все открытые частицы характеризуют процессы, происходящие в атомах и ядрах. Этот этап практически совпадает с развитием ядерной физики.

В 1928 г. Полем Дираком теоретически было предсказано существование античастицы, которая, в отличие от электрона, имела положительный заряд. Позитрон (первая античастица) был открыт в 1932 г. американским физиком К. Андерсоном<sup>48</sup> при наблюдении космического излучения. Впоследствии оказалось, что каждой частице соответствует античастица.

Одна из первых частиц, не входящих в состав ядра, была предсказана при анализе бета-распада — это нейтрино. Гипотезу о существовании пятой слабо взаимодействующей с веществом частицы выдвинул 4 декабря 1930 г. Паули<sup>49</sup>. Частицу Э. Ферми на итальянский манер назвал «нейтрино».

На втором этапе (1932–1949) открыт ряд новых частиц.

<sup>47</sup> Понятие кванта энергии было введено Планком в 1900 г., светового кванта в 1905–1917 гг. — А. Эйнштейном, а термин «фотон» в 1926 г. ввел американский физик и химик Г. Льюис.

<sup>48</sup> **Карл Дейвид Андерсон** (1905–1991) — американский физик-экспериментатор. Открыл позитрон, за что был удостоен Нобелевской премии по физике в 1936 г. Открыл механизм образования электрон-позитронных пар; в 1936 г. Андерсон открыл мюон, который считал квантом сильного взаимодействия, предсказанного Юкавой.

<sup>49</sup> **Вольфганг Эрнст Паули** (1900–1958) — швейцарский физик-теоретик, работавший в области физики элементарных частиц и квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике 1945 г. Открыл новое квантовое число (позднее названное спином), сформулировал фундаментальный принцип запрета Паули, объяснивший строение электронных оболочек атомов. В 1930 г. выдвинул предположение о существовании элементарной частицы нейтрино, ставшее вторым по значимости его вкладом в ядерную физику.

В 1953 г. в опытах К. Коуэна и Ф. Рейнеса<sup>50</sup> прямым образом были зарегистрированы свободные нейтрино в процессе (1.11):

$$\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad (1.11)$$

В их эксперименте реакторные антинейтрино  $\tilde{\nu}_e$  взаимодействовали с протонами мишени. В улучшенных условиях этот эксперимент был повторен ими в 1956 г.: было измерено сечение процесса (1.11), которое составило  $1.1 \cdot 10^{-43}$  см<sup>2</sup>.

Гипотеза о существовании еще одного вида нейтрино (кроме уже известного электронного) была предложена в 1940-х гг. Экспериментально на ускорителе в Брукхейвене мюонное нейтрино было обнаружено группой исследователей под руководством Л. Ледермана<sup>51</sup>, М. Шварца<sup>52</sup> и Д. Стейнбергера<sup>53</sup> в 1962 г.

За это открытие ученые были удостоены Нобелевской премии по физике в 1988 г. Было показано, что при взаимодействии мюонных нейтрино с нейтроном рождаются мюоны (1.12) и не рождаются электроны (1.13):

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-, \quad (1.12)$$

$$\nu_\mu + n \not\rightarrow p + e^-. \quad (1.13)$$

<sup>50</sup> **Фредерик Райнес** (1918–1998) — американский физик. Родился в Нью-Джерси, США, в семье евреев-эмигрантов из России. Получил докторскую степень по физике в Нью-Йоркском университете в 1944 г. В 1951 г. Райнес становится профессором физики и деканом факультета физики Технологического института в Питтсбурге. За открытие нейтрино Райнес (совместно с Мартином Перлом) был удостоен Нобелевской премии по физике в 1995 г. (Коуэн, его соавтор по открытию, умер в 1974 г.). Стал лауреатом других престижных наград, включая премию имени Роберта Оппенгеймера и Национальной научной медали США.

<sup>51</sup> **Леон Макс Ледерман** (род. 1922) — американский физик, профессор, лауреат премии Вольфа по физике (1982), лауреат Нобелевской премии по физике (1988) за открытие мюонного нейтрино. Родился в Нью-Йорке, в семье еврейского иммигранта из Украины Мориса Ледермана. Участвовал в проектировании мощнейшего в мире синхроциклотрона. Открыл нейтральный каон, антинейтрон, ипсилон-мезон, мюоний, исследовал рождение лептонных пар в адронных столкновениях. Открыл второй тип нейтрино — мюонное нейтрино. В 1977 г. нашел подтверждение существования b-кварка. В 1979–1989 гг. Ледерман — директор национальной лаборатории им. Ферми в Батавии (Иллинойс, США). Возглавлял строительство и использование первого и самого мощного в мире сверхпроводящего ускорителя.

<sup>52</sup> **Джон Генри Шварц** (род. 1941) — американский физик-теоретик. Один из создателей теории струн. Изучал математику в Гарварде и теоретическую физику в Калифорнийском университете. Защитил диссертацию в 1966 г. Лауреат Нобелевской премии 1988 г. «за метод нейтринного пучка и демонстрацию дублетной структуры лептонов через открытие мюонного нейтрино».

<sup>53</sup> **Джек Стейнбергер** (род. 1921, Германия), американский физик, профессор, лауреат Нобелевской премии по физике (1988) «за открытие и исследование нейтрино и антинейтрино». Окончил Чикагский университет, в 1948 г. защитил диссертацию. В 1968–1986 гг. — ведущий научный сотрудник, а затем научный руководитель и директор Европейского центра ядерных исследований в Швейцарии (ЦЕРН).

Неожиданность между собой нейтрино и антинейтрино подтверждалась невозможностью процесса



Позднее, в 1975 г., были открыты  $\tau$ -мюоны, в 2000 г. соответствующие им нейтрино в процессах



В реакциях слабых взаимодействий для каждого типа нейтрино соблюдаются законы сохранения лептонных чисел<sup>54</sup> (электронного  $L_e$ , мюонного  $L_\mu$ , таонного  $L_\tau$ ).

Появилось понятие лептонных чисел, которые, как оказалось, также сохраняются в ядерных реакциях. В экспериментах на ускорителях было установлено, что существует три вида лептонов: электрон  $e^-$ , мюон  $\mu^-$ , таон  $\tau^-$ <sup>55</sup>, а также соответствующие им нейтрино: электронное  $\nu_e$ , мюонное  $\nu_\mu$  и таонное  $\nu_\tau$ . Всем этим частицам соответствуют античастицы:  $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\tau^+$ ,  $\tilde{\nu}_e$ ,  $\tilde{\nu}_\mu$ ,  $\tilde{\nu}_\tau$ .

Когда для объяснения природы ядерных сил оказалось недостаточно имеющихся частиц, физики стали вести поиски кванта ядерного взаимодействия в космических лучах (также без применения ускорителей). При исследовании космических лучей сначала были открыты в 1938 г.  $\mu^\pm$ -мезоны, которые не участвовали в ядерных взаимодействиях. Позднее был открыт  $\pi$ -мезон<sup>56</sup>, подходящий на эту роль (в 1947 г. были открыты  $\pi^\pm$ -мезоны, а в 1950 г. —  $\pi^0$ -мезон). Однако для исследования свойств и превращений этих частиц интенсивности космических лучей было недостаточно. По-

<sup>54</sup> Лептонные числа и закон сохранения их в ядерных реакциях ввели в 1953 г. Е. Конопинский и М. Махмуд.

<sup>55</sup> **Мартин Льюис Перл** (1927–2014) — американский физик, профессор, общественный деятель. Сын эмигрантов из Белоруссии. В 1948 г. окончил Политехнический институт в Бруклине. В середине 1970-х гг. коллаборация под руководством Мартина Перла на Стенфордском ускорителе открыла элементарную частицу  $\tau$ -лептон. За открытие третьего поколения элементарных частиц ( $\tau$ ,  $\tau$ -нейтрино, верхний и нижний кварки) Перл был удостоен премии Вольфа по физике 1982 г. Лауреат Нобелевской премии по физике 1995 г. «за открытие  $\tau$ -лептона». Вторую половину премии получил Фредерик Райнес «за экспериментальное обнаружение нейтрино».

<sup>56</sup> **Сесил Фрэнк Пауэлл** (1903–1969) — британский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1950 г. «за разработку фотографического метода исследования ядерных процессов и открытие мезонов, осуществленное с помощью этого метода». Кроме Нобелевской премии Пауэлл был награжден медалью им. Ломоносова. Под его руководством группой исследователей были экспериментально обнаружены заряженные пионы. Поскольку ускорителей, достаточно мощных для рождения пионов, тогда не было, проводился поиск с помощью фотопластинок, поднятых на аэростате в стратосфере.

этому дальнейшие исследования продолжились на ускорителях, энергия которых стала достаточной для получения интенсивных пучков  $\mu^\pm$ -мезонов и  $\pi$ -мезонов. К таким ускорителям относятся линейные ускорители, фазотроны, изохронные циклотроны с энергиями порядка 1 ГэВ. На их основе впоследствии строились мезонные фабрики для исследования взаимодействия и превращения частиц под действием мезонов. Таким образом, на втором этапе было открыто пять новых частиц и одна античастица. Кроме того, была открыта частица — кандидат на роль кванта сильного взаимодействия и установлен факт взаимопревращения частиц. Это ставило задачу дальнейшего увеличения энергии ускорителей (роль которых начала возрастать еще сильнее) для исследования характеристик и превращений открытых частиц и поиска новых.

На следующем, третьем, этапе развития физики элементарных частиц (1949–1964) для исследования элементарных частиц и их свойств в разных странах строят ускорители на еще более высокие энергии (1–10 ГэВ), создаются ускорительные комплексы высоких энергий. Их роль в научных исследованиях становится основной. На них впоследствии было открыто большое количество элементарных частиц и их античастиц: странные частицы, разные типы нейтрино, резонансы, исследована также структура нуклонов. Этот этап характеризуется необходимостью систематизации открытых частиц, построением первых таких схем.

Антипротон был открыт в 1955 г. на ускорителе протонов на синхрофазотроне Калифорнийского университета в Беркли (называемом бэватроном) с максимальной энергией 6.3 ГэВ физиками Сегре<sup>57</sup> и Чемберленом<sup>58</sup>. Для проведения опыта необходимо было, во-первых, чтобы суммарная кинетическая энергия сталкивающихся частиц в системе центра масс превышала энергию покоя пары «протон — антипротон». Во-вторых, должен был соблюдаться закон сохранения барионного заряда, т.е. число родившихся антипротонов должно быть равно числу образовавшихся протонов. Исследование было поставлено таким образом: пучок протонов из ускорителя с энергией 4.3–6.3 ГэВ падал на медную мишень, в которой в результате взаимодействия протонов с ядрами меди рождались различные частицы; магниты отбирали отрицательно заряженные частицы, отклоняя их в направлении черенковских

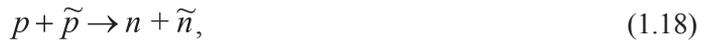
<sup>57</sup> **Эмилио Джинно Сегре** (1905–1989) — американский физик, профессор. Родился в Италии. В 1922–1927 гг. учился на инженерном факультете Римского университета. Защитил докторскую диссертацию под руководством Э. Ферми. В 1936 г. назначен деканом физического факультета Университета Палермо, лауреат Нобелевской премии по физике 1959 г. совместно с О. Чемберленом «за открытие антипротона».

<sup>58</sup> **Оуэн Чемберлен** (1920–2006) — американский физик. Участник Манхэттенского атомного проекта. Докторскую диссертацию защитил в Чикагском университете под руководством Ферми. Лауреат Нобелевской премии по физике вместе с Э. Сегре «за открытие антипротона». Был активным борцом за ядерное разоружение.

счетчиков, при этом по измеренной скорости частиц определяли их массу (из соотношения между импульсом, измеряемым по отклонению продуктов реакции в магнитном поле, и их скоростью). В опыте рождалось несколько антипротонов при столкновении протонов с медной мишенью:



На том же ускорителе, что и антипротоны, в 1956 г. в протон-антипротонных столкновениях Брюсом Корком<sup>59</sup> был открыт антинейтрон. Сталкиваясь с ядрами мишени, антипротон может отдать свой отрицательный заряд одному из протонов ядра (или приобрести от него положительный). При этом образуется пара «нейтрон — антинейтрон» в реакциях



Регистрация антинейтрона представляла достаточно сложную техническую задачу. Подтверждением образования антинейтрона являлась последующая аннигиляция его с нейтроном или протоном другого ядра. Сам антинейтрон не оставлял следа (например, в фотографических эмульсиях), однако при аннигиляции возникало несколько заряженных частиц, следы которых выходили из одной точки.

На ускорителях стали широко использовать усовершенствованные камеры Вильсона<sup>60</sup> для регистрации частиц. Это привело к открытию все новых элементарных частиц.

Были установлены схемы взаимопревращений элементарных частиц в результате их взаимодействия или самопроизвольного распада, например:



<sup>59</sup> **Брюс Корк** (1916–1994) — американский физик. В 1956 г. открыл антинейтрон. Он работал в Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли. С 1968 по 1974 г. — профессор физики Мичиганского университета.

<sup>60</sup> **Чарлз Томсон Риз Вильсон** (1869–1959) — шотландский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1927 г. за «метод визуального обнаружения траекторий электрически заряженных частиц с помощью конденсации пара» (совместно с А. Х. Комптоном). В 1892 г. окончил университет в Кембридже. С 1896 г. работал над созданием камеры для регистрации заряженных частиц. В 1911 г. ему удалось зарегистрировать фотографически следы отдельных  $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частиц и электронов. В последующие годы он совершенствовал эту технику и опубликовал в 1923 г. свои знаменитые статьи о траекториях электронов.

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^+. \quad (1.22)$$

Исследование реакций с участием элементарных частиц позволило подтвердить справедливость законов сохранения в физике элементарных частиц — лептонных чисел (электронного лептонного числа  $L_e$ , лептонного мюонного числа  $L_\mu$ , позднее лептонного таонного числа  $L_\tau$ ), барионного заряда (сохранения числа нуклонов в любых реакциях). Действие этих законов иллюстрирует простой пример распада свободного нейтрона, в котором сохраняется электрический  $Q$  и барионный  $B$  заряды, а также электронное лептонное число  $L_e$ :

$$n \rightarrow e^- + p + \tilde{\nu}_e, \quad (1.23)$$

$$\begin{aligned} L_e: & 0 \quad 1 \quad 0 \quad -1, \\ Q: & 0 \quad -1 \quad 1 \quad 0, \\ B: & -1 \quad 0 \quad 1 \quad 0. \end{aligned} \quad (1.24)$$

В 1954 г. в экспериментах на ускорителе с энергией 3 ГэВ (так называемом космотроне в Брукхейвене) и в 1958 г. в составе космических лучей были открыты  $\Sigma^\pm$ -гипероны (метастабильные частицы с массой больше массы протона, временем жизни порядка  $10^{-10}$  с и странными свойствами) со следующими схемами распада:

$$\begin{aligned} \Sigma^+ & \rightarrow \begin{cases} p + \pi^0, \\ n + \pi^+, \end{cases} \\ \Sigma^- & \rightarrow n + \pi^-. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Позднее, в 1959 г., при облучении водородной мишени  $\pi^-$ -мезонами и  $K$ -мезонами с энергией 1.37 ГэВ открыты новые нейтральные  $\Sigma^0$ - и  $\Xi^0$ -гипероны:

$$\pi^- + p \rightarrow \Sigma^0 + \theta^0, \quad (1.26)$$

$$K^- + p \rightarrow \Xi^0 + K^0. \quad (1.27)$$

Частиц со странными свойствами было открыто много. Были установлены характеристики этих странных частиц, например большое (по сравнению с ядерным временем) время жизни ( $10^{-8}$ – $10^{-10}$  с). Анализ экспериментов при энергиях 1–2 ГэВ с участием  $\Sigma^0$ - и  $\Xi^0$ -гиперонов и  $K$ -мезонов привел к необходимости введения квантового числа — странности  $S$ , для которого аналогично лептонным числам справедлив закон сохранения  $S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}} = \Delta S = 0$ .

Различные группы частиц имели некоторые общие свойства, но отличались другими свойствами. Эти группы менялись в зависимости от выбранной общей характеристики. Чтобы оценить картину микромира в целом, необходимо было систематизировать все открытые элементарные частицы.

В период с 1964 г. (условно называемый четвертым этапом) была предложена модель строения частиц из кварков. В рамках нее систематизированы уже открытые частицы и предсказаны новые (например,  $\Omega^-$ -гиперон). Далее последовало развитие этой модели из трех- в четырехкварковую, создание единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий. Для этого периода характерно успешное взаимодействие теории и ее подтверждение в экспериментальных исследованиях на ускорителях, к которым постоянно возрастало требование по увеличению энергии и интенсивности пучка.

В экспериментах на ускорителях высоких энергий подтвердились предположения о наличии структуры элементарных частиц. Наиболее детально структура нуклона исследовалась на Стенфордском линейном ускорителе электронов (SLAC) с максимальной энергией 21 ГэВ. На пучке электронов с энергией 10 ГэВ было установлено, что взаимодействие электронов высоких энергий происходит не со всем протоном, а с некоторой его частью (партоном или кварком). Анализ результатов экспериментов показал наличие трех таких центров рассеяния на протоне.

В 1979 г. на ускорительной установке PETRA были зарегистрированы трехструйные события, которые подтверждают вывод квантовой хромодинамики о существовании квантов сильного взаимодействия — глюонов.

Необходимость четвертого кварка была обусловлена невозможностью ряда распадов, например:

$$K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^- \quad (1.28)$$

В теории слабых взаимодействий эти распады описывались нейтральными слабыми токами, которые конструировались из четырех лептонов и трех кварков. Введение четвертого кварка позволяло привести в соответствие теорию и эксперимент.

В 1974 г. в Брукхейвене на пучке протонов с энергией 28 ГэВ и интенсивностью  $2 \cdot 10^{12}$  протонов/цикл и Стенфорде при столкновении в системе центра масс ( $e^+e^-$ ) с энергией 2.6–8 ГэВ открыта  $J/\psi$  частица. Как оказалось, она состоит из нового типа кварков (очарованных кварка и антикварка)  $J/\psi \rightarrow c\bar{c}$ . Примерами очарованных частиц, также открытых на протонных пучках, являются очарованные странные и нестранные мезоны  $D_s^+$ ,  $D_s^{*+}$ ,  $D^0$ ,  $D^{*0}$  и очарованные барионы  $\Lambda_c^+$ ,  $\Xi_c^+$ .

Эксперименты для проверки и развития кварковых моделей проводились на построенных специально для этих целей больших ускорительно-

накопительных комплексах (например, на международном ускорительном комплексе в ЦЕРН, построенном в 1971 г.).

Ускорительный комплекс в ЦЕРН реконструировался в 1976 и 1983 гг. До первой реконструкции он состоял из протонного синхротрона на энергию 26 ГэВ. Встречные пучки  $pp$ - и  $p\bar{p}$ -коллайдера имели энергию 26 ГэВ, которая далее возросла до  $31.4 \times 31.4$  ГэВ, а затем был построен еще один коллайдер с энергией протонов и антипротонов  $270 \times 270$  ГэВ, которая возросла до  $450 \times 450$  ГэВ. Это позволило при столкновении протонов и антипротонов на синхротроне в ЦЕРН в 1981 г. открыть кванты слабого взаимодействия —  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозоны.

В лаборатории им. Ферми в Батавии (США) на пучке протонов с энергией 400 ГэВ в 1977 г. были открыты  $\Upsilon$ -мезоны с массой  $m_\Upsilon \approx 10m_p$ , а затем  $\Upsilon'$ - и  $\Upsilon''$ -мезоны. Точное измерение их масс было осуществлено на встречных  $e^+e^-$  пучках с энергией 10 ГэВ в Германии на установке ДОРИС. Открытие  $\Upsilon$ -мезона позволило установить существование пятого кварка — красивого ( $b$ ), так как он представляет собой связанное состояние кварка красивого  $b$  и его антикварка:  $\Upsilon \rightarrow b\bar{b}$ .

В 1983 г. в ЦЕРН был запущен комплекс LEAR (Low Energy Antiproton Ring), интенсивность которого после модернизации в 1988 г. составила  $3 \cdot 10^6$   $\bar{p}$ /с, импульс 0.06–2 ГэВ/с. Причем эти протонные пучки замедлялись. На таких ускорительных комплексах высоких энергий были открыты нейтральные токи, кванты сильного взаимодействия — глюоны, исследовались особенности структуры  $\tilde{N}N$ -взаимодействия при низких энергиях, взаимодействие антипротонов с ядрами, осуществлялась проверка CP-, T-, CPT-симметрии.

На ускорителях в экспериментах на встречных пучках  $e^+e^-$  подтверждено существование глюонов — квантов сильного взаимодействия. В такого рода экспериментах было установлено несохранение CP-четности и сохранение CPT-четности.

В 1965 г. в Брукхейвене на беватроне (протонном синхротроне) с использованием масс-спектрометра были зарегистрированы антиядра дейтрона, состоящие из антипротона и антинейтрона. На протонном синхротроне с энергией 70 ГэВ в Протвино были открыты ядра антигелия и антитрития в начале 1970-х гг.

При рассеянии  $\pi$ -мезонов высоких энергий, полученных на линейных ускорителях и протонных синхротронах, на нуклонах наблюдались резонансные состояния с временем жизни примерно  $10^{-23}$  с с образованием двух или более элементарных частиц. При значениях кинетической энергии  $\pi$ -мезонов 190, 600, 900 и 1300 МэВ в сечениях ( $\pi$ -p) рассеяния наблюдались резонансные максимумы шириной порядка 100 МэВ. Такая система квазисвязанного состояния  $\pi$ -мезона и нуклона получила название резонанса. Впоследствии на ускорителях высоких энергий было открыто множество подобных систем. Первый такой резонанс  $\Delta^{++}$  имел массу  $m_\Delta = 1230 \div 1234$  МэВ.

Таким образом, на этом этапе были установлены переносчики трех видов взаимодействий: электромагнитного (фотон), сильного (глюон), слабого ( $W^{\pm}$ - и  $Z^0$ -бозоны).

Примерно с 1989 г. ускорительные комплексы высоких энергий строятся для подтверждения выводов разработанных теорий. К этому времени кварковая модель получает дальнейшее развитие и основывается на симметрии из шести лептонов и шести кварков. Открытие на ускорителях высоких энергий шестого  $t$ -кварка в 1995 г. привело к трансформации четырехкварковой модели в шестикварковую. Это стало подтверждением сделанного ранее в 1975 г. открытия  $\tau$ -лептона (соответствующее ему  $\tau$ -нейтрино было открыто в 2000 г.), указывавшего на существование шестого кварка.

Подтвердилось проявление симметрии между кварками и лептонами. Позднее были установлены законы сохранения новых квантовых чисел — шарма, очарования. Всего законов сохранения в физике элементарных частиц установлено более десяти: помимо законов сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и трех лептонных чисел, к ним относятся сохранение в ядерных реакциях до и после взаимодействия числа нуклонов — барионного заряда ( $B = \text{const}$ ), а также странности ( $S = \text{const}$ ), очарования ( $c = \text{const}$ ), красоты ( $b = \text{const}$ ), СРТ-четности, а также сохранение четности, зарядовой четности  $C$ , комбинированной  $CP$ -четности в определенных реакциях. Некоторые из перечисленных законов сохранения выполняются не для всех взаимодействий.

В 1974 г. Г. Джорджи и Ш. Глешоу была предложена модель Великого объединения (ее еще называют  $SU(5)$  моделью, где  $SU(5)$  — унитарная пятимерная группа) электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий. Эта модель получила название Стандартной модели.

В конце XX века стали разрабатывать теорию, которая смогла бы объединить четыре вида взаимодействий. Однако это оказалось сложной задачей, поэтому фундаментальные взаимодействия в настоящее время (на шестом этапе развития физики элементарных частиц) описывают в рамках общей теории относительности (ОТО) и Стандартной модели (СМ). Современные представления о строении вещества утверждают, что при энергиях  $\sim 10^{16}$  ГэВ, а в теории суперсимметрии при энергиях на три-четыре порядка выше точки Великого объединения (при планковской энергии  $\sim 10^{19}$  ГэВ) должно происходить объединение всех четырех видов взаимодействий. Эксперименты по проверке моделей ставятся исключительно на ускорительно-накопительных комплексах высоких энергий.

В настоящее время в рамках теории образования Вселенной — общепризнанной теории Большого взрыва смыкаются актуальные проблемы ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики.

Для объяснения механизмов возникновения и эволюции Вселенной важную роль играет объяснение механизма возникновения массы. С этой целью

в 1967 г. А. Саламом и С. Вайнбергом было введено хиггсовское поле с бесспиновыми хиггсовскими бозонами, которые обуславливают нарушение симметрии. В рамках Стандартной модели (СМ) масса возникает при взаимодействии безмассовых частиц с хиггсовским полем, в результате которого они приобретают массу. Хиггсовские бозоны<sup>61</sup>, согласно СМ, обладают массой, причем, по имеющимся в настоящее время экспериментальным данным, их предполагаемая масса может составлять

$$114.4 \text{ ГэВ} < m_{\text{H}}^0 c^2 < 251 \text{ ГэВ}.$$

Для обнаружения и исследования этих частиц необходимо строительство ускорителей на еще более высокие энергии, чем действующие в настоящее время.

На протон-антипротонном коллайдере Теватроне с максимальной энергией 980×980 ГэВ, работавшем в национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, был открыт и шестой топ-кварк, масса которого составляет 171.4±2.1 ГэВ. Однако энергии этого ускорителя оказалось недостаточно для обнаружения хиггсовского бозона.

В настоящее время действует новый ускорительный комплекс в ЦЕРН на энергию 7×7 ТэВ<sup>62</sup>. Создание ускорительного комплекса БАК позволило приступить к изучению свойств топ-кварка; осуществить поиск хиггсовских бозонов с целью изучения механизма нарушения электрослабой симметрии; исследовать переход вещества в состояние кварк-глюонной плазмы; проверить теорию «суперсимметрии» (утверждающей о существовании у каждой субатомной частицы более тяжелого партнера); изучить фотон-адронные и фотон-фотонные столкновения, а также проверить ряд экзотических теорий.

<sup>61</sup> **Питер Уэйр Хиггс** (род. 29 мая 1929 г., Ньюкасл-апон-Тайн, Англия) — британский физик-теоретик, член Королевского Общества Эдинбурга, член Лондонского королевского общества. Обучался в Королевском колледже Лондона. Лауреат Нобелевской премии по физике 2013 г. совместно с Франсуа Энглером за предсказание бозона Хиггса. Он наиболее известен благодаря предложенному им в 1960-х гг. механизму спонтанного нарушения электрослабой симметрии, объясняющему происхождение массы элементарных частиц и, в частности, масс векторных *W*- и *Z*-бозонов. Механизм, в настоящее время носящий его фамилию, предсказывает существование новой частицы, хиггсовского бозона. Об открытии частицы было объявлено 4 июля 2012 г. на пресс-конференции ЦЕРН (сам Хиггс заявил по этому поводу, что не ожидал экспериментального подтверждения собственной теории при своей жизни). За достижения в области теоретической физики П. Хиггс был награжден большим числом премий и медалей. В частности, он является лауреатом медали Дирака, присуждаемой Институтом физики (Лондон), а также премии 1997 г. в области физики частиц и физики высоких энергий, присуждаемой Европейским физическим обществом.

<sup>62</sup> В создании этого уникального международного ускорительно-накопительного комплекса принимает участие несколько сотен физиков и инженеров из нашей страны и других стран СНГ. Общий финансовый и интеллектуальный вклад России в этот проект достаточно велик.

Помимо уникальных и интересных задач физики элементарных частиц, ускорители используются для получения пучков вторичных частиц, которые также играют важную роль в исследованиях в ядерной физике и физике элементарных частиц.

### 1.3. Получение на ускорителях пучков вторичных частиц

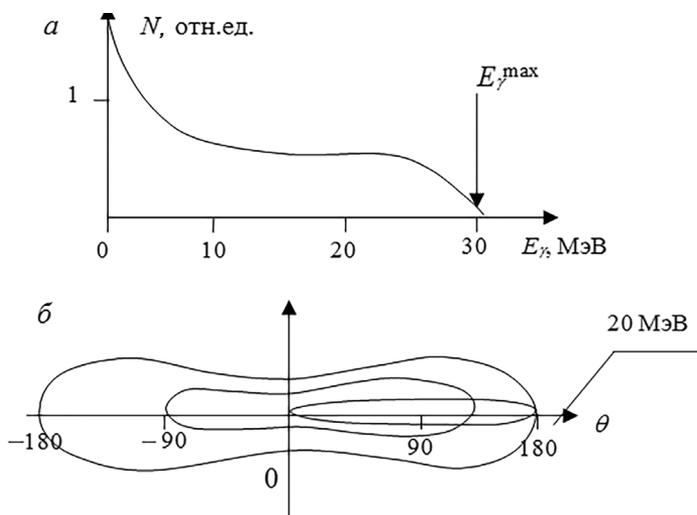
Широкое применение как в научных исследованиях, так и в практике получили пучки вторичных частиц, получаемых на ускорителях:  $\gamma$ -квантов, нейтронов,  $\pi$ -мезонов,  $K$ -мезонов (каонов), нейтрино, а также античастиц — позитронов и антипротонов. Кроме того, к вторичным излучениям относится и синхротронное, возникающее в кольцевых ускорителях, в основном получаемое в синхротронах. А также вторичным излучением является черенковское и переходное излучения.

**Тормозное  $\gamma$ -излучение.** На ускорителях электронов средних энергий — бетатронах, линейных ускорителях, микротронах получают пучки тормозного  $\gamma$ -излучения. Теория тормозного излучения была разработана А. Зоммерфельдом<sup>63</sup>. Спектр и угловое распределение тормозных фотонов представлены на рис. 1.1.

Интенсивность тормозного излучения зависит от тока пучка электронов, их энергии, материала мишени и ее толщины. Интенсивность тормозного излучения пропорциональна току пучка и более резко возрастает с ростом энергии.

В качестве мишени из-за требований к теплостойкости лучше всего использовать тантал или вольфрам. Толщина тормозной мишени определяется двумя факторами. Чем толще мишень, тем большая доля электронов передает свою энергию в виде тормозного излучения. При этом, однако, начинает сказываться поглощение низкоэнергетической части спектра в самой мишени. Для вольфрама оптимальной оказывается толщина мишени 1 мм. При низких энергиях

<sup>63</sup> **Арнольд Иоганнес Вильгельм Зоммерфельд** (1868–1951) — немецкий физик-теоретик и математик. Получил ряд важных результатов в рамках «старой» квантовой теории, предшествовавшей появлению современной квантовой механики: обобщил теорию Бора на случай эллиптических орбит с учетом релятивистских поправок и объяснил тонкую структуру спектров водородного атома, построил квантовую теорию нормального эффекта Зеемана, установил ряд спектроскопических закономерностей, ввел главное, азимутальное, магнитное и внутреннее квантовые числа и соответствующие правила отбора. Разработал теорию непрерывного спектра тормозного излучения. Лауреат многих научных наград. Член нескольких немецких Академий наук, а также многих иностранных Академий, в том числе и АН СССР.



**Рис. 1.1:** а) энергетический спектр тормозного излучения электронов (называемый спектром Шиффа) с энергией 30 МэВ,  $E_{\gamma}^{\max} = W_e - m_e c^2 = \hbar \nu_{\max}$ ; б) угловое распределение тормозного излучения для пучков электронов при разных энергиях  $\gamma$ -квантов

тормозящихся электронов (0.1 МэВ) угловое распределение тормозного излучения практически симметрично по всем направлениям. С ростом энергии тормозное излучение становится все более направленным вперед (например, 0.5 МэВ на рис. 1.1, б) по направлению пучка. При энергиях электронов выше 20 МэВ распределение тормозных фотонов становится узконаправленным. Тормозные фотоны в этом случае практически не вылетают в направлении, перпендикулярном направлению движения пучка электронов.

Тормозное излучение из всех видов ионизирующих излучений, получаемых на ускорителях, наиболее широко используется в мировом хозяйстве: науке, промышленности, медицине, радиобиологии, радиохимии. Всего в науке, народном хозяйстве и медицине для получения пучков тормозного излучения используется более 24 000 ускорителей электронов из общего их числа (около 27 000).

Тормозное излучение является основным инструментом в научных исследованиях взаимодействия фотонов с атомными ядрами (физике фотоядерных реакций), космическом материаловедении. В медицине — в лучевой терапии — более чем в 98% случаев применяют пучки тормозного излучения. В промышленности неразрушающий контроль, дефектоскопия также используют пучки тормозного излучения. В сельском хозяйстве, в радиационной стерилизации, радиоэкологии также значительную долю составляет использование пучков тормозного излучения.

Нейтроны возникают либо при распаде (делении) ядер, либо в ядерных реакциях. Они широко применяются в научных исследованиях, для производства радиоизотопов как для промышленного использования, так и для радионуклидной диагностики (например, нейтронные генераторы) в ядерной медицине. В ограниченном количестве (в основном экспериментально) нейтронные пучки применяются непосредственно в лучевой терапии. Они эффективны в дефектоскопии и неразрушающем контроле. Их непосредственное использование в мировом хозяйстве пока невелико, но последние годы оно быстро расширяется.

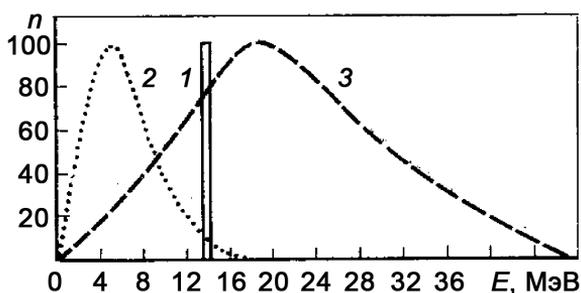
В качестве источника нейтронов применяются реакторы, а также циклотроны и высоковольтные ускорители трансформаторного типа, которые часто называют генераторами дейтронов.

В реакторах получают нейтроны с широким спектром энергий от 0 до 17 МэВ. Однако средняя энергия нейтронов в этом случае составляет около 2 МэВ. Нейтронов с энергией более 2 МэВ образуется небольшое количество. Поэтому нейтроны с энергией более 2 МэВ лучше получать на ускорителях. На ускорителях получают высокоэнергетические нейтроны с энергией 0–50 МэВ. Для этой цели используются реакции взаимодействия дейтронов с бериллиевой или с тритиевой мишенью:



В первом случае спектр нейтронов простирается от нулевой до почти максимальной энергии дейтронов (рис. 1.2, кривые 2 и 3), во втором — возникают практически моноэнергетические нейтроны с энергией 14–15 МэВ.

Циклотроны имеют преимущество над высоковольтными ускорителями, поскольку позволяют варьировать энергию и спектр нейтронов. Высоковольтные ускорители более дешевые и компактные. В них получается более интенсивный первичный пучок заряженных частиц и, следовательно, интенсивность пучка нейтронов также возрастает.



**Рис. 1.2.** Спектр нейтронов, получаемых на:  
1 — генераторе нейтронов;  
2 — на циклотронах при энергии дейтронов 16 МэВ;  
3 — на циклотронах при энергии дейтронов 50 МэВ

**$\pi$ -Мезоны и  $K$ -мезоны.** Пучки  $\pi$ - и  $K$ -мезонов используются в основном в фундаментальных исследованиях. С их помощью было исследовано большое число взаимопревращений в физике элементарных частиц.

$\pi$ -Мезоны получили широкое практическое применение. Интерес к ним основывается на их особенностях взаимодействия с веществом. Первоначально они тормозятся по тем же законам, что протоны и электроны. Потери энергии для них хорошо описываются формулой Бете — Блоха. Однако в конце пути они захватываются атомами, а затем с орбиты под действием сильного взаимодействия захватываются ядрами, что приводит к их распаду на фрагменты ядер, протоны, нейтроны и  $\alpha$ -частицы. В результате линейные потери энергии в конце пути движения  $\pi$ -мезона в веществе возрастают. Это приводит к возникновению максимума в глубинном распределении дозы (рис. 1.3), аналогичного пику Брэгга, возникающего при торможении протонов в веществе.

В его формирование вносит вклад как увеличение переданной веществу энергии в конце пробега  $\pi$ -мезонов, так и передача веществу кинетической энергии осколков звездного распада ядер при поглощении ими  $\pi$ -мезонов.

Это обстоятельство стало причиной их практического применения в лучевой терапии. В ряде центров лучевой терапии тяжелыми заряженными частицами были разработаны и использованы методики на пучках  $\pi$ -мезонов. Однако впоследствии оказалось, что их использование достаточно дорого и не обладает преимуществами по сравнению с использованием пучков протонов.

Пучки вторичных частиц  $\pi$ -мезонов получают на линейных ускорителях протонов или протонных синхротронах в реакциях, например:

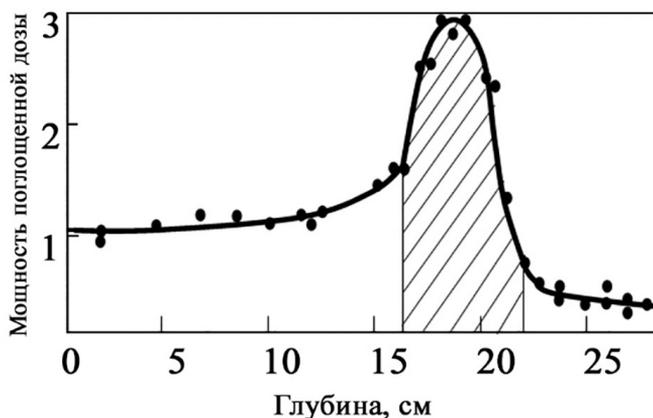
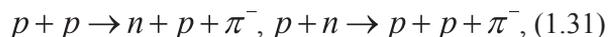
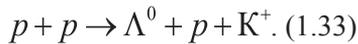


Рис. 1.3. Распределение мощности дозы в воде (или ткани)

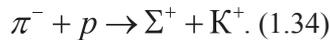


На так называемых «мезонных фабриках» — сильноточных линейных ускорителях протонов с энергией в несколько сот МэВ — получают интенсивные пучки  $\pi$ -мезонов, которые используются для получения новых элементарных частиц.

В «мезонных фабриках» используются либо сильноточные кольцевые ускорители (Канада, Швейцария), либо линейные ускорители протонов (США, Троицк). В Троицке «мезонная фабрика» действует на базе линейного ускорителя протонов с энергией 600 МэВ и током 1 мА. На ней получают при бомбардировке мишени протонами пучки  $\pi$ -мезонов или К-мезонов. Пример реакции с образованием К-мезонов:



Масса покоя  $\pi$ -мезона составляет  $m(\pi^-) = 139$  МэВ, а К-мезона — 493 МэВ. На пучках  $\pi$ - и К-мезонов было открыто и исследовано семейство гиперонов  $\Lambda, \Sigma^\pm, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$ . Примерами таких реакций на пучках  $\pi$ -мезонов являются



При облучении дейтериевой мишени пучком  $K^+$ -мезонов был открыт в 1971 г. анти-сигма-минус-гиперон ( $\tilde{\Omega}^+$ ):



**Нейтрино.** Особую роль играет физика нейтрино. Изучение нейтрино — один из уникальнейших инструментов исследования картины образования Вселенной. В настоящее время на ускорителях получают интенсивные пучки нейтрино и изучают методы их эффективной регистрации.

Потоки нейтрино получают из космоса, в реакторах и на ускорителях. Космос представляет собой естественный источник нейтрино.

Искусственными источниками являются ядерные реакторы и ускорители элементарных частиц (как правило, протонов и электронов), ускоренные  $\beta$ -активные ядра, а также «мезонные фабрики», в которых нейтрино образуются в различных ядерных реакциях. Тип рожденного в этих реакциях нейтрино определяет закон сохранения лептонного заряда.

Ядерный реактор, например, был использован в первом эксперименте по обнаружению нейтрино. В реакторе пучки нейтрино возникают в ядерных реакциях под действием нейтронов и при распаде свободных нейтронов. Пучки имеют высокую интенсивность, но вполне определенную нерегулируемую энергию.

Использование ускорителей элементарных частиц позволяет изменять энергию испускаемых нейтрино, получая при этом пучки нейтрино высокой интенсивности. Энергия нейтрино в данном случае зависит от энергии ускоренных частиц, а максимальная энергия нейтрино определяется максимальной энергией ускорителя.

Пучки мюонных нейтрино получают на мезонных фабриках, когда при взаимодействии протонов с протонами возникают пучки  $\pi$ -мезонов, которые при распаде создают потоки нейтрино:

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, & \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu. \end{aligned} \quad (1.36)$$

В этом случае для выделения мюонных нейтрино мюоны поглощаются веществом, а нейтрино проникают сквозь толстый слой вещества, за которым располагается детектор — вещество, в котором регистрируется нейтрино.

Аналогично на пучках протонов, тормозящихся в мишени, получают пучки  $K$ -мезонов различных зарядов, потоки которых разделяются магнитным полем.  $K$ -мезоны также распадаются с испусканием мюонных нейтрино в процессах

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \\ K^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \end{aligned} \quad (1.37)$$

$\tau$ -Нейтрино возникают при распаде  $\tau$ -мюонов:

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau, \quad \tau^+ \rightarrow \pi^+ + \bar{\nu}_\tau. \quad (1.38)$$

Проблема регистрации из-за малого ( $10^{-30}$ – $10^{-43}$  см<sup>2</sup>) сечения взаимодействия нейтрино с веществом — основная в физике нейтрино. Сечение взаимодействия нейтрино с веществом зависит от энергии нейтрино. Для нейтрино сверх высоких энергий до  $10^{21}$  эВ сечение взаимодействия возрастает до величины  $10^{-30}$  см<sup>2</sup>.

Поскольку вероятность взаимодействия нейтрино с веществом мала, то, например, нейтрино с энергией 1 МэВ имеет в свинце длину свободного пробега  $\sim 10^{20}$  см ( $\sim 100$  св. лет).

Благодаря своей проникающей способности, нейтрино являются уникальным источником информации о процессах, происходящих в ядрах звезд, об астрономических событиях, значительно отдаленных от наблюдателя. Астрономические тела для нейтрино практически прозрачны.

В будущем с помощью пучков нейтрино может исследоваться, например, состав ядра Земли, поскольку лишь столь слабо взаимодействующие с веществом частицы могут проникнуть на глубину нескольких тысяч километров.

Весьма интересной является идея использования нейтрино для осуществления связи. В США уже проведен первый эксперимент, в котором через толстый слой Земли была передана и расшифрована информация модулированного нейтринного пучка. Такая связь могла бы использоваться при передаче информации на другую сторону Земли или на космические станции, установленные на других астрономических объектах (Луна, Марс и др.). Возможно ее использование и для связи с космическим кораблем, осуществляющим дальний перелет.

С нейтрино связано множество других задач теоретической, ядерной физики и астрофизики: измерение массы нейтрино; роль нейтрино в скрытой массе Вселенной; поиск параметров осцилляций нейтрино, углов смешивания и разницы квадратов масс; поиск суперсимметричных партнеров нейтрино; исследование астрофизических объектов и явлений при помощи потоков нейтрино и другие. Некоторые из этих проблем, такие как осцилляции нейтрино, поиск темной материи, астрономические наблюдения, могут быть решены при помощи нейтринных телескопов.

**Позитроны.** Пучки позитронов используют в основном в научных исследованиях. Их получают чаще всего в процессе рождения электрон-позитронных пар в электрическом поле атома или ядра:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (1.39)$$

Пучки позитронов создают для проведения физических экспериментов, прежде всего для коллайдеров, где они сталкиваются с электронами или протонами.

Позитроны ускоряются так же, как электроны, поскольку их время жизни в вакууме может быть неограниченно большим, до тех пор, пока на их пути не встретятся электроны и не произойдет аннигиляция.

Процесс аннигиляции позитронов лежит в основе принципа действия в позитронных томографах. В научной литературе предлагаются методы использования в лучевой терапии пучков позитронов или  $\beta^+$ -активности тканей после их облучения пучком протонов. Аннигиляция позитронов с образованием двух  $\gamma$ -квантов (образование в этом процессе трех  $\gamma$ -квантов не превышает 1%):

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma, e^+ + e^- \rightarrow 3\gamma \quad (1.40)$$

Регистрация их на совпадение может быть использована в лучевой диагностике. При облучении тканей пучком тормозных фотонов высоких энергий (более 20 МэВ) часть из них в поле ядра и электрона будет образовывать электрон-позитронные пары. При энергиях более 20 МэВ этот механизм будет доминирующим. Образовавшиеся позитроны аннигилируют вблизи

от места своего возникновения. Аннигиляционные фотоны регистрируются на совпадение, и по ним можно судить о распределении дозы от пучка тормозных фотонов. Это позволяет в динамике следить за облучением всего объема мишени и совместить на одной установке и диагностику, и терапию.

Антипротоны получают при столкновении протонов, ускоренных до высоких энергий с протонами мишени, например, в процессе



Пучки антипротонов получают для научных исследований столкновений протонов и антипротонов высоких и сверхвысоких энергий в коллайдерах. Они концентрируются в накопительных кольцах, где антипротоны либо просто накапливаются, либо немного ускоряются. Антипротоны используются в экспериментах для получения и исследования свойств новых элементарных частиц, например:



Существуют достаточно экзотические идеи об их использовании в лучевой терапии. Попадание антипротонов в ядра и аннигиляция в них приводит к разрыву ядра на осколки и выделению существенно (в миллион раз) большей энергии, чем при аннигиляции в биологической ткани, например позитронов. Пик Брэгга в этом случае будет иметь амплитуду во много раз большую, чем при торможении протонов. Но это вероятные проекты дальнего будущего.

**Синхротронное излучение**<sup>64</sup>. При вращении заряженных частиц в постоянном магнитном поле электроны, двигаясь с центростремительным ускорением, излучают электромагнитные волны. Величина ускорения обратно пропорциональна ее массе, а интенсивность излучения пропорциональна квадрату ускорения:

$$I \sim a^2 = \left( \frac{F}{m} \right)^2, \quad (1.43)$$

<sup>64</sup> Проблема излучения релятивистского заряда, движущегося по окружности, рассматривалась методами классической электродинамики Максвелла — Лоренца еще в конце XIX в. Новый интерес к проблеме излучения электронов при ускоренном движении в магнитном поле был вызван развитием техники электронных ускорителей, широко используемых для решения задач физики высоких энергий. После пуска в эксплуатацию первых индукционных циклических ускорителей — бетатронов — возникла проблема ограничения энергии электронов, достижимой в бетатроне. В 1944 г. Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчук опубликовали статью, в которой показали, что потери на магнитотормозное излучение в циклическом ускорителе пропорциональны четвертой степени энергии, до которой ускорены электроны. Визуально излучение удалось увидеть в 1947 г. аспиранту Флойду Хаберу в лаборатории, руководимой Поллоком на одном из первых синхротронов фирмы «Дженерал электрик».

где  $F$  — центростремительная сила,  $m$  — масса частицы. Таким образом, энергия излучения электронов в  $\sim 10^6$  раз больше энергии излучения при вращении протонов по орбите такого же радиуса. Поскольку такое излучение впервые было получено на синхротронах, оно получило название синхротронного излучения. Мощность синхротронного излучения пропорциональна энергии электрона  $E$  в четвертой степени и квадрату величины магнитного поля  $B$ :

$$P = \frac{\mu_0 r_e}{6\pi c m_e^2} B^2 E^4, \quad (1.44)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Вс/А,  $r_e$  — классический радиус электрона.

Источниками синхротронного излучения служат электронные синхротроны и накопительные кольца. Хотя синхротронное излучение возникает в бетатронах и микротронах, интенсивность синхротронного излучения в них невелика. Спектр синхротронного излучения простирается от миллиметровых волн до рентгеновского диапазона и мягкого  $\gamma$ -излучения, обладает широким, непрерывным, легко перестраиваемым спектром, перекрывающим практически весь рентгеновский диапазон и область ультрафиолетового излучения (длиной волны 0.1–100 нм). В кольцевых накопителях электронов с большим током удается получить узкий с высокой плотностью поток излучения на уровне  $10^{15}$  фотон/с/мм<sup>2</sup>/мрад.

Для электронов высоких энергий синхротронное излучение распространяется по касательной к траектории электрона в виде узкого конуса (рис. 1.4). В физике ускорителей оно представляет способ диагностики поведения пучка в процессе ускорения. В научных исследованиях используется в рентгеновском структурном анализе, спектрометрии газов и твердых тел.

В последние годы расширяется применение синхротронного излучения в промышленности, биологии и медицине.

Синхротронное излучение применяется в рентгенолитографии, что позволяет улучшить качество элементов микросхем, увеличив в сотни раз разрешение отображений и повысив их контрастность. Кроме того, оно эффективно в разнообразных биологических исследованиях, расшифровке структуры белка, создании новых лекарственных препаратов. Его использование повышает качество и контраст рентгеновских снимков. Контраст определяется различием плотности и атомного веса исследуемых объектов, которое для биологических тканей сравнительно невелико, поэтому диагностировать опухоль в организме человека на ранней стадии

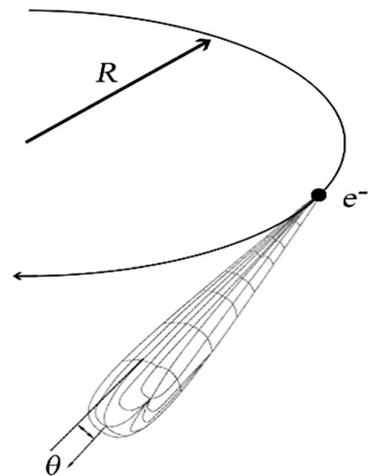


Рис. 1.4. Синхротронное излучение пучка электронов в ускорителе

ее образования совсем непросто. Кроме того, применение для диагностики монохроматического рентгеновского излучения позволяет не облучать организм всем спектром рентгеновского излучения, а лишь узкой его частью, соответствующей толщине и плотности объекта. Это позволяет в разы снизить дозу облучения пациента, которая при тщательном обследовании может оказаться довольно значительной.

**Черенковское излучение**<sup>65</sup> возникает при движении заряженной частицы в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде. Это излучение испускает частица, которая движется равномерно прямолинейно со скоростью, превышающей скорость распространения света в данной среде:

$$v = c / n,$$

где  $n$  — показатель преломления среды. Физической причиной возникновения черенковского излучения является поляризационный эффект, имеющий место при прохождении заряженной частицы через вещество.

Потери энергии на черенковское излучение примерно в тысячу раз меньше ионизационных потерь энергии. Для легких частиц электронов или позитронов эта величина еще меньше. Несмотря на то, что тормозное излучение существенно интенсивней черенковского, в области видимого света, наоборот, потери энергии на черенковское излучение примерно на пять порядков выше, чем тормозное. Это обстоятельство и позволило заметить черенковское излучение. Значительное преобладание черенковского излучения над тормозным в видимой области спектра позволило использовать его для регистрации частиц и определения их характеристик. Такие детекторы части получили название черенковских. На практике они имеют много слоев. Регистрируя черенковское излучение от каждого слоя, можно определить направление движения и скорость частицы. Они широко используются для регистрации продуктов взаимодействия частиц, например в Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

**Переходное излучение**<sup>66</sup> — это излучение электромагнитных волн равномерно и прямолинейно движущейся заряженной частицей при пересечении ею границы раздела двух сред с разными показателями преломления.

<sup>65</sup> Это излучение Вавилова — Черенкова было обнаружено экспериментально в 1934 г. аспирантом Вавилова Черенковым. Он, занимаясь исследованием  $\gamma$ -люминесценции растворов под действием фотонов, заметил слабое голубое свечение жидкостей. Вавилов доказал, что замеченное свечение — это не люминесценция, которая возникает в случае перехода атомов из возбужденных состояний в основное. Его образуют быстрые электроны, возникающие в жидкости под действием фотонов. Теорию излучения разработали советские физики И. М. Франк и И. Е. Тамм в 1937 г. В 1958 г. П. А. Черенкову, И. М. Франку и И. Е. Тамму была присуждена Нобелевская премия по физике.

<sup>66</sup> Переходное излучение (ПИ) предсказано В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком в 1945 г. Они показали, что излучение должно возникать по обе стороны от границы раздела, и рассчитали энергию, излучаемую назад — в среду, из которой выходит частица, пересекая

Продольное и поперечное распределение электрического поля определяется скоростью частицы. С приближением ее скорости к скорости света поле «вытягивается» в поперечном направлении и «сплющивается» в продольном. Когда частица переходит в другую среду, ее поле меняется. Это сопровождается излучением электромагнитных волн на границе раздела двух сред. Такое излучение получило название переходного, оно происходит «вперед» и «назад». Сообщение об экспериментальном его обнаружении было опубликовано в 1959 г. П. Голдсмитом и Л. Джелли. Они наблюдали оптическое переходное излучение (яркое белое пятно), образованное пучком частиц на металлической поверхности, расположенной в вакууме, а также показали, что его характеристики совпадают с предсказанными теоретически В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком. Применение ПИ в физических экспериментах для детектирования частиц началось почти 20 лет спустя.

Линейная связь между энергией частицы и ее потерями на излучение используется для создания детекторов заряженных частиц. В них используют до 1000 слоев вещества, разделенных газовыми промежутками (часто применяется газ ксенон, имеющий достаточно высокий заряд  $Z = 54$ ). В этом случае интенсивность регистрируемого переходного излучения пропорциональна числу слоев в детекторе. Такие детекторы позволяют регистрировать частицы сверхвысоких энергий, например, в космических лучах. Детекторы переходного излучения используются прежде всего для регистрации и идентификации самых легких заряженных частиц — электронов и позитронов в ультрарелятивистской области энергий.

## 1.4. Лазер на свободных электронах<sup>67</sup>

О лазере на свободных электронах необходимо сказать отдельно. Физики давно мечтали создать лазер в ультрафиолетовой, рентгеновской и гамма-областях. Создать когерентный и узконаправленный энергетический пучок, который позволил бы детальнее исследовать ядро. Кроме того, у него было бы много очень важных областей применения. В медицине, например, если бы удалось уменьшить его размеры, он существенно превзошел бы возможности обычного рентгена. Такая установка могла бы исследовать каждый вид тканей при необходимой энергии, и не пришлось бы переоблучать организм тормозными

---

границу раздела. Ими было предсказано, что излучение будет происходить и «вперед», и «назад».

<sup>67</sup> Первым шагом в создании ЛСЭ можно считать статью П. Л. Капицы и П. А. М. Дирака в 1933 г., где был описан так называемый эффект Капицы — Дирака — вынужденное комптоновское рассеяние.

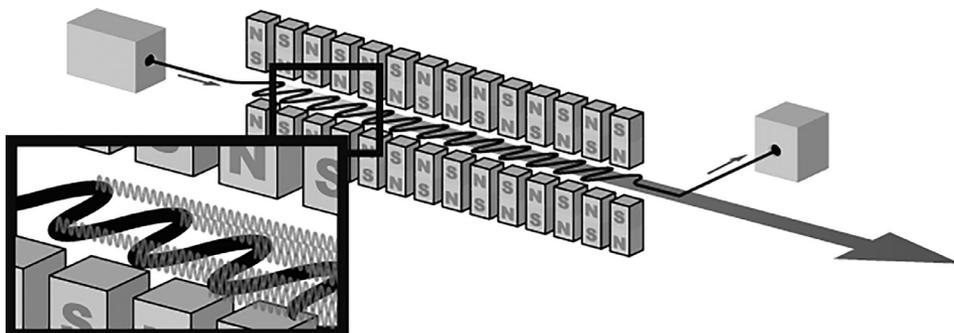


Рис. 1.5. Прохождение электронов через ондулятор

фотонами всего спектра. И это только один из множества его преимуществ. Важны энергия получаемых фотонов, интенсивность пучка и размеры установки.

Первый проект создания лазера на свободных электронах был предложен в 1971 г. Джоном М. Дж. Мэйди, а в 1976 г. были продемонстрированы первые опыты с ЛСЭ с использованием электронов с энергией 24 МэВ и 5-метрового вигглера (ондулятора) для усиления излучения. Его мощность составляла 300 МВт, а эффективность всего 0.01%, но была показана работоспособность таких устройств. Для создания рентгеновского лазера основным элементом является ускоритель электронов — циклический или линейный, которые работают, как правило, в импульсном режиме. Длительности импульсов электронных пучков лежат в интервале  $10^{12}$ – $10^6$  с. ЛСЭ работают в диапазоне длин волн от 1 мм до 1 Å. Пучок электронов из ускорителя проходит (рис. 1.5) сквозь ондулятор (вигглер), который представляет собой ряд расположенных специальным образом магнитов. В них пучок движется по синусоидальной траектории, излучая поток фотонов. Далее поток, как и в прочих лазерах, собирается и усиливается системой зеркал, установленных на концах ондулятора. Возникает интенсивный пучок синхротронного излучения в интервале длин волн от видимого до рентгеновского диапазона.

Перспектива использования ЛСЭ позволит достигнуть разрешения в 0.1 нм, что даст возможность получить изображения атомов и молекул. Уменьшение размеров установок до настольных позволит их применять в медицинских целях (например, в медицинской диагностике) и промышленности (например, в микроэлектронике и неразрушающем контроле). Могут быть также исследованы перспективы применения лазера на свободных электронах в качестве оружия противовоздушной и противоракетной обороны.

**Термоядерный синтез.** В мире используются два подхода к решению этой научной проблемы, и оба они связаны с использованием укорителей. В первом используются системы с низким давлением и большим временем удержания (установки типа токамак). В них дейтерий-тритиевая смесь удерживается

магнитным полем, которое возникает вокруг дейтерий-тритиевого пучка частиц, двигающегося по круговой орбите.

В другом подходе используются системы с очень высокой плотностью, маленьким временем удержания. Ускорительные технологии играют ключевую роль в обеих системах. Примером такой системы является реактор с магнитным удержанием плазмы, такой как ITER, строящийся во Франции международным консорциумом.

Другой пример — демонстрационная фабрика DEMO. В ней ионные пучки смогут участвовать в технике нагрева плазмы. Однако, чтобы этого достичь, необходима высокая эффективность потока ионных пучков. Пучки должны иметь ток в десятки ампер отрицательно заряженных ионов с кинетической энергией около 1 МэВ. Они нейтрализуются и внедряются в плазму. Заряженные частицы нагревают небольшой элемент, содержащий термоядерное топливо. При сжатии топливо воспламеняется, высвобождая энергию для выработки электричества. Элемент располагается в камере реактора. Это приводит к сокращению затрат, упрощению обслуживания, уменьшению трудностей, связанных с безопасностью и радиационным загрязнением.

# Глава 2

## Ускорители в промышленности

Технологии с использованием ускорителей стали разрабатываться с 1950-х гг. Сейчас в мировом хозяйстве, по оценкам экспертов, не считая медицины, работают около 27 000 ускорителей<sup>68</sup>, большинство из которых используются для создания новых материалов и изменения их свойств.

Скорость внедрения ускорителей в качестве промышленных инструментов обработки неуклонно возрастает на протяжении последнего десятилетия. Так, по данным за 2010 г., общая стоимость продуктов и товаров с использованием пучков заряженных частиц превысила 500 млрд долларов США.

Общее количество ускорителей, действующих в промышленном производстве, включает в себя более 11 000 ускорителей ионов, менее 3500 ускорителей протонов и 11 500 ускорителей электронов. Значительная часть промышленных ускорителей работает в производстве новых материалов посредством имплантации ионов — 11 000 и электронно-лучевой обработке материалов — 7500 (рис. 2.1). Ускорителей протонов, используемых для производства изотопов (в том числе и для медицинских целей), и пучков нейтронов соответственно 1500 и 2000 единиц. Для неразрушающего анализа и облучения электронным пучком используются ускорители электронов — соответственно 2000 и 3000 единиц.

Ускорители ионов, применяемые в промышленности, имеют, как правило, низкие энергии, которые в большинстве случаев простираются от нескольких сотен электронвольт до 500 кэВ. Они используются для имплантации ионов при изготовлении полупроводниковых материалов, микросхем, компьютерных чипов.

Промышленные ускорители протонов имеют энергии от 0.5 до 70 МэВ. Они применяются для получения пучков нейтронов, для определения свойств

---

<sup>68</sup> Считается, что за 60 лет в мире введено в эксплуатацию более 27 тыс. ускорителей различного промышленного назначения. В среднем промышленный ускоритель работает 20–40 лет. Поэтому количество действующих ускорителей ниже этой цифры. В общее число промышленных ускорителей не включены электронно-лучевые трубки, рентгеновские трубки, системы для литографии или электронно-лучевой микроскопии и т.д. В него не входят и ускорители, действующие в закрытых учреждениях. С другой стороны, приведенная численность ускорителей относится к литературе двухлетней давности. В год вводится в строй от 500 до 1000 ускорителей. По этой причине их число может быть выше 27 000.

материалов, дезактивации отработанного ядерного топлива. Для производства радиоактивных изотопов наиболее широко используются циклотроны с энергиями 4, 18 и 70 МэВ.

Энергия промышленных ускорителей электронов в подавляющем большинстве случаев не превышает 10 МэВ и считается граничной для возникновения наведенной активности. В зависимости от энергии промышленные ускорители электронов условно делят на три группы: низко-, средне- и высокоэнергетические.

К низкоэнергетическим ускорителям электронов относятся установки с энергией пучка 70–300 кэВ. Их используют для сшивания полимеров, очистки жидкостей и газов, поверхностной стерилизации, разогрева плазмы при термоядерном синтезе.

Среднеэнергетические с энергией пучка 300 кэВ — 5 МэВ используют для производства кабелей и проводов с радиационно-сшитой изоляцией, сшивки пластика и резины, труб, для производства термоусаживающихся изделий и пенополиэтилена, для вулканизации компонентов шин, очистки сточных вод и выбросных газов.

Высокоэнергетические (5–10 МэВ) с мощностью пучка до 100 кВ применяют для стерилизации медицинского оборудования, сшивки толстого пластика, в дефектоскопии, для таможенного досмотра крупногабаритных грузов.

Большая часть ускорителей электронов в народном хозяйстве имеет невысокие энергии (до 0.5 МэВ), но при этом обладает высокой мощностью пучка (300–350 кВт). Они обычно используются в радиационном производстве и в области прикладных исследований, например для электронной резки

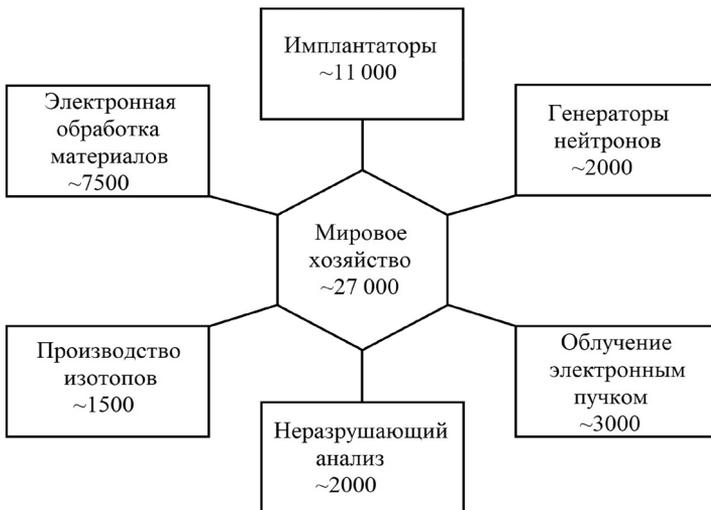


Рис. 2.1. Ускорители в мировой промышленности

и сварки, получения пучков тормозного  $\gamma$ -излучения для радиоактивационного анализа. Излучение, генерируемое на ускорителях, применяется для отверждения покрытий; отделки текстильных материалов; получения нанопорошков; в радиационно-термическом крекинге нефти и многом другом.

Применение ускорителей электронов разных энергий определяется толщиной слоя вещества, куда должны проникнуть электроны. Для поверхностной обработки слоев толщиной до единиц миллиметров применяются низкоэнергетические ускорители. Если слой вещества достигает 1–2 см, то используют среднеэнергетические ускорители, а при толщине слоя до 5 см — высокоэнергетические.

В табл. 2.1–2.3 приведены характеристики некоторых известных типов промышленных низко- и среднеэнергетических ускорителей.

**Таблица 2.1**

**Характеристики некоторых низкоэнергетических ускорителей электронов**

Тип ускорителя	Изготовитель	Энергия, МэВ	Мощность, кВт	Ширина пучка, м
ESH	Polimer-Physik (Германия)	0.15–0.28	до 56	0.22–2.5
ESP	Nissin-High Voltage Co., Ltd. (Япония)	0.3	7.5	0.45
		0.3	19.5	1.2
		0.3	30	1.8
Аврора-2	НИИЭФА (Россия)	0.3–0.5	25	0.5–2.0
ЭОЛ-400	Радиотехнический институт (Россия)	0.4	14	до 2.0
Electrocurtain	Energy Sciences Inc. (США)	0.15–0.3	до ~100	0.5–2.0
BroadBeem	RPC Industries (США)	0.15–0.3	до 360	0.3–2.5
LEA	Institute of Surface Modification (Германия)	0.15–0.2	до 60	до 1.5
Электрон-16	НИИЭФА (Россия)	0.25–0.3	30	до 2.0
ТУР-М	НТЦ «Энергия» (Россия)	0.15–0.28	10	до 1.8
Астра-11	НПО «Астрофизика» (Россия)	0.2–0.3	25	0.6
Тапир	Фирма «Текра» (Россия)	0.3	30	1.2–2.1

Из высоковольтных ускорителей можно выделить ускорители «Dynamitron» (группа IBA), электронный трансформатор ICT (High Voltage Engineering Corporation, США), EPS (Nissin-High Voltage Co., Ltd, Япония), ускорители серии ЭЛВ (ИЯФ СО РАН) и ускорители электронов серий «Электрон» и «Ав-

Таблица 2.2

## Параметры некоторых среднеэнергетических ускорителей электронов

Тип ускорителя	Изготовитель	Энергия, МэВ	Максимальная мощность, кВт
Электронный трансформатор ЭЛТ	Институт ядерной физики СО РАН	1.5–2.2	15
Электронный трансформатор ЭЛВ	Институт ядерной физики СО РАН	0.2–2.5	~100
Резонаторный линейный ускоритель ИЛУ	Институт ядерной физики СО РАН	0.5–2.5	30
Трансформатор с изолированным сердечником ICT	High Voltage Engineering Corp. (США)	0.3–2.5	125
Трансформатор с изолированным сердечником FDJ	Research Inst. of Automation for Mashine Building Industry (КНР)	0.3–1.2	24
Электрон (тип Кокрофта — Уолта)	НИИЭФА (Россия)	0.75–2.5	~100
EPS (тип Кокрофта — Уолта)	Nissin-High Voltage Co., Ltd. (Япония)	0.8–5.0	~150–200
Dinamitron	Radiation Dynamics Inc. (США)	0.55–5.0	~200

рора» (НИИЭФА, Россия). Основным их преимуществом является возможность получения высоких токов и мощностей пучка, высокая эффективность (60–80%) вывода пучка. Например, ускоритель ЭЛВ-6М характеризуется следующими параметрами: энергия электронов 0.75–1 МэВ, максимальный ток 200 мА, максимальная мощность пучка 160 кВт, ускорители электронов серий «Электрон» и «Аврора» имеют энергию от 0.3 до 2.5 МэВ с током до 40 мА.

К их недостаткам относятся: большие размеры и вес (например, длина ЭЛВ-6М около 6 м), небольшая энергия ускорения (менее 5 МэВ), высокая вероятность пробоев, необходимость использования дорогостоящего изолирующего газа под высоким давлением, необходимость создания локальной радиационной защиты, высокая (более \$1 млн) стоимость.

В отличие от высоковольтных ускорителей, энергия пучка в импульсных линейных ускорителях, к которым относятся ускорители серии ИЛУ (ИЯФ СО РАН) (\$5 млн), Rhodotron (IBA) (\$8 млн), Linatron (Varian) (\$1 млн), Surebeam (L3 Communication) и др., как правило, не превышает 10 МэВ. Они не требу-

Таблица 2.3

**Параметры некоторых высокоэнергетических ускорителей электронов**

<b>Тип ускорителя</b>	<b>Изготовитель</b>	<b>Энергия, МэВ</b>	<b>Максимальная мощность, кВт</b>
Rhodotron	IVA Industrial (США)	2–10	560
Surebeam	L3 Communication (США)	5–10	150
Linatron	Varian (США)	9	30
Linac	Getinge Group (Франция)	10	20
ИЛУ-14	ИЯФ СО РАН	10	100
UEL-10-D	НИИЭФА (Россия)	10	10
Mevex High power	Mevex (Канада)	10	30
Торий	НИИЯФ МГУ	10	10

ют газонаполненных сосудов под высоким давлением. Однако достижимые в них средние токи и эффективность существенно ниже, чем в высоковольтных ускорителях. Так, для ускорителя ИЛУ-8 (энергия 10 МэВ) средний ток составляет менее 10 мА и менее 20 мА в ускорителях ИЛУ с энергией 1–5 МэВ. Невысока и эффективность ускорителей, или их КПД, — менее 30%, а для ускорителей фирмы IVA — 55%.

Кроме того, для ряда радиационных технологий неприемлемым является импульсный характер излучения. Как и ускорителям прямого действия, ускорителям ИЛУ присущи такие недостатки, как большие габариты (длина до 4 м), необходимость специальных помещений с радиационной защитой для размещения ускорителей и высокая стоимость в серийном производстве.

Линейные ускорители непрерывного действия и разрезные микротроны — новое направление развития ускорительной техники, позволяющее создать машину, по мощности и эффективности приближающуюся к высоковольтным ускорителям, но значительно более компактную и простую в эксплуатации. Известно о нескольких попытках сделать мощный ускоритель электронов непрерывного действия, однако к настоящему времени успешный опыт в этом направлении имеется только в НИИЯФ МГУ. Параметров такого ускорителя (энергия — от 0.5 до 2.5 МэВ, ток — 60 мА, мощность — 30 кВт) никому достигнуть не удалось.

В 1984–2014 гг. российская промышленность разработала более 200 ускорителей<sup>69</sup> для осуществления промышленных радиационно-технологических процессов (без учета ускорителей для медицины, дефектоскопии и томографии).

<sup>69</sup> Электронные ускорители для радиационно-технологических установок разработаны на предприятиях: ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск); ФГУП НПП «Торий» (Москва); ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (Санкт-Петербург); ОАО МРТИ РАН (Москва); НИЯУ

На современном этапе развития радиационных технологий электронные ускорители используются значительно шире, чем источники  $\gamma$ -излучения. Это обусловлено большей радиационной безопасностью и большей мощностью электронных ускорителей.

В радиационных технологиях условно можно выделить области химической, физической и биологической технологии. Эти области пересекаются между собой, а граница между ними весьма условна. В целом они развиваются в направлениях: радиационного модифицирования материалов (преимущественно полимерных); радиационной полимеризации, в том числе радиационного отверждения; сшивания полимеров, обработки поверхностей; радиационной деструкции (в основном полимерных материалов); радиационной биологии и экологии (радиационной микробиологии, радиационной стерилизации медицинских изделий и препаратов, а также обработки пищевых продуктов).

К технологиям радиационной физики относятся радиационные способы создания новых материалов и полупроводников, ионная имплантация, обработка изделий электронной техники, электронная сварка и т. п. К технологиям радиационной химии относятся радиационная стойкость полимерных материалов, создание новых материалов радиационной полимеризации, в том числе радиационного отверждения и сшивания полимеров.

Общими задачами технологий радиационной химии и физики являются увеличение коррозионной стойкости металлов и сплавов при ионной имплантации, радиационное легирование<sup>70</sup> полупроводников, получение высокопрочных материалов и т. п. Они используются для получения радиоактивных изотопов, в радиоактивационном (РАА) и рентгеновском эмиссионном анализе (РЭА).

К технологиям в радиационной биологии относятся радиационная обработка сельскохозяйственной продукции и продуктов питания, стерилизация медицинских изделий, радиационная экология.

Пучки ускоренных частиц и  $\gamma$ -квантов применяются для уничтожения вредных микроорганизмов в сельском хозяйстве, для определения состава пород на глубине земли, для обеззараживания питьевой и сточной воды, твердых и жидких (в том числе радиационных) отходов.

---

МИФИ (Москва); Институт сильноточной электроники СО РАН (Томск); Институт электрофизики УрО РАН (Екатеринбург), НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ (Москва); ФГУП НПП «Исток» (Фрязино); ФГУП РФЯЦ ВНИИ экспериментальной физики (Саров); ФГУП РФЯЦ ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина (Снежинск); ФГУП «Исследовательский центр им. М. В. Келдыша» (Москва).

<sup>70</sup> **Легирование** (в переводе с латинского *ligare* — «связывать») — это добавление в состав материалов примесей для изменения и улучшения физических и химических свойств материала. Легирование является обобщающим понятием ряда технологических процедур. Различают объемное (металлургическое) и поверхностное (ионное, диффузное и др.) легирование.

В целом, конечно, непросто отнести ту или иную технологию к физической, химической или биологической. Они тесно переплетаются.

Для радиационных технологий в промышленности используются в большей степени высоковольтные, линейные (импульсные и непрерывного действия) ускорители. Технологии радиационной физики наиболее широко распространены в различных отраслях промышленности. Наиболее широкое распространение они приобрели в ионной имплантации, где, как уже отмечалось, действует более 11 тыс. ускорителей ионов. К ним относятся радиационные способы создания новых материалов и полупроводников, конструкция микросхем, обработка изделий электронной техники, электронная сварка, наработка радиоизотопов, неразрушающий анализ, получение нейтронов и т. д.

Радиационно-технологические процессы, реализуемые на линейных ускорителях электронов, имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими способами обработки материалов и промышленных изделий:

- обеспечиваются большие мощности и дозы облучения, которые позволяют существенно повысить производительность производства;
- обеспечивается значительная экономия электроэнергии (по сравнению с термическим способом в 10 раз, с фотохимическим — в 2–3 раза);
- производство отличается высокой экологической чистотой, поскольку в процессе обработки не используются химические реагенты, не образуется остаточной радиации, а сами ускорители электронов при условии надежной защиты в процессе их эксплуатации безопасны;
- обработка любых изделий и пищевых продуктов может проводиться в упаковке;
- обеспечивается минимальное повышение температуры облучаемой продукции;
- короткое время обработки (доли минуты).

Рассмотрим некоторые наиболее развитые радиационные промышленные технологии.

## 2.1. Ионная имплантация

Под ионной имплантацией понимают способ введения атомов примесей в поверхностный слой вещества путем бомбардировки его поверхности пучком ионов с энергией 10–5000 кэВ. Он универсален, поскольку позволяет вводить любые примеси в любое твердое тело. Этот способ отличается чистотой и точностью процесса легирования<sup>71</sup>, так как практически исключается по-

---

<sup>71</sup> Ионная имплантация и ионное легирование — практически идентичные понятия.

падение других примесей. Процесс происходит при комнатных температурах. Ионная имплантация используется для создания полупроводниковых транзисторов и резисторов. Полупроводники обычно легируются ионами бора, фосфора, мышьяка. В результате бомбардировки ионами в приповерхностном слое полупроводника образуется повышенная концентрация донорных или акцепторных примесей, позволяющих создать  $p$ - $n$ -переходы и низкоомные контакты. Она применяется для легирования металлов, т.е. изменения их физических и химических свойств (повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и т.д.).

Существует два вида легирования: диффузионное (включает в себя стадию внедрения примеси и последующую диффузию атомов внедряемого вещества при воздействии внешнего электрического поля) и ионное. Легирование позволяет менять свойства металлов и сплавов. Создаются композиционные материалы из двух или нескольких видов веществ в строго заданном соотношении, которые обладают уникальными свойствами, существенно отличающимися от свойств основной массы вещества. Таким способом создают прочные и стойкие к коррозии поверхностные слои материалов. Это необходимо, например, при изготовлении режущих инструментов, обшивки различных аппаратов, эксплуатируемых в тяжелых условиях (корабли, автомобили, самолеты).

Физический смысл ионной имплантации заключается в том, что ускоренные ионы атомов требуемого элемента можно вводить на заданную глубину и достигать равномерной их концентрации в определенном слое вещества.

При выполнении ионного внедрения задаются следующие важнейшие параметры. При внедрении в вещество в технологии легирования ионы ускоряют до энергии от 1 до 500 кэВ. Ее величина определяется ускоряющим напряжением между ионным источником и мишенью. От нее зависит глубина залегания примеси, которая, например, для тяжелых ионов в кремнии составляет единицы микрон. Пробег можно вычислить, используя теоретические модели.

Для легирования используют количество ионов в интервале  $10^{13}$ – $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, от интенсивности пучка ионов зависит концентрация легирующей примеси. Плотность ионного тока в зависимости от типа и особенностей конструкции ионного источника составляет 10 нА/см<sup>2</sup> — 10 мА/см<sup>2</sup>. Плотность тока ионов определяет время, за которое в материале будет достигнута необходимая концентрация ионов.

Внедрение ионов в кристаллическую решетку облучаемого материала приводит к появлению дефектов в его структуре. Из узлов решетки выбиваются атомы вещества. Возникают вакансии и дефекты структуры облучаемого материала. Между атомами материала оказываются внедренные межузловые атомы. Такие же дефекты возникают при застраивании ионов между узлами решетки.

Ионы с энергией 1–10 кэВ не вызывают изменений в структуре образца, тогда как более энергетические потоки ионов могут значительно его разрушить.

При ионной имплантации проявляется ряд нежелательных эффектов, таких как эффект каналирования, создание аморфной среды у приповерхностного слоя, образование радиационных дефектов.

Эффект каналирования наблюдается при попадании иона в свободное пространство между рядами атомов. Такой ион постепенно теряет энергию в результате слабых скользящих столкновений со стенками канала и в конце концов тормозится. Затем он захватывает свободные электроны и превращается в нейтральный атом. Атом продолжает процесс диффузии в веществе. Расстояние, проходимое ионом в канале, может в несколько раз превышать длину пробега иона в аморфной мишени. Механизм каналирования приводит к размытию конечного пробега ионов. Распределение примеси в этом случае получается неравномерным.

Взаимодействие с электронами атомных оболочек приводит к смещению и колебанию атомов. Ядерные взаимодействия ионов приводят к столкновениям с ядрами атомов, в результате чего они смещаются или при высокой энергии ионов могут быть выбиты из своих положений.

Легкие и тяжелые ионы по-разному взаимодействуют с веществом. Легкие ионы при попадании в мишень первоначально тормозятся атомными электронами. В распределении смещенных атомов по глубине вещества образуется максимум концентрации. При внедрении тяжелых ионов они сразу начинают сильно тормозиться ядрами атомов кремния.

Тяжелые ионы смещают большое количество атомов мишени из узлов кристаллической решетки вблизи поверхности подложки. Распределение плотности радиационных дефектов повторяет распределение длин пробега выбитых атомов кремния. В распределении внедренных ионов возникает широкий пик. Например, в кремниевой пластинке легкие ионы испытывают в основном торможение атомными электронами, тяжелые ионы  $^{31}\text{P}$  и  $^{75}\text{As}$  тормозятся ядрами атомов кремния.

Так электронная тормозная способность вычисляется в модели<sup>72</sup>, когда электроны в мишени — газ, а ион — шарик, который ламинарно движется в нем. В этом случае торможение пропорционально скорости или корню квадратному из кинетической энергии, т. е.

$$S_e = k \cdot E^{1/2}, \quad (2.1)$$

где коэффициент  $k$  — функция порядковых номеров и атомных масс иона и атомов мишени.

<sup>72</sup> Глубина проникновения внедряемой примеси вычисляется по теории Линдхарда — Шарфа — Шютта (ЛШШШ).

В случае кремния  $k \approx 0,2 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}^{1/2} \cdot \text{см}^2$ . Данная модель применима при условии, что скорость иона должна быть много меньше скорости электронов на поверхности Ферми. Поскольку в ионной имплантации применяются энергии пучков в десятки и сотни кэВ, то это условие выполняется практически всегда.

Выражение для ядерной тормозной способности в этом случае имеет вид, не зависящий от энергии иона:

$$S_n^0 = 2,8 \cdot 10^{-15} \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_1}{M_1 + M_2}, \quad (2.2)$$

где  $Z_1, M_1$  — заряд и атомная масса иона,  $Z_2, M_2$  — заряд и атомная масса атомов мишени.

Ситуация становится совсем простой, если преобладает один из двух механизмов торможения: либо ядерная тормозная способность много больше электронной,  $S_n \gg S_e$ , или наоборот,  $S_n \ll S_e$ . Тогда для полного среднего пробега можно записать (энергия в электронвольтах, пробег в ангстремах):

$$R_{\text{cp}} = 0,7E \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad (2.3)$$

для случая  $S_n \gg S_e$ :

$$R_{\text{cp}} = 20E^{1/2} \quad (2.4)$$

для случая  $S_n \ll S_e$ .

Пробег протонов и  $\alpha$ -частиц хорошо измерен экспериментально. Для его аналитического расчета получены эмпирические формулы. По ним можно рассчитать пробег произвольного иона в заданном веществе. Однако эти формулы применимы для ограниченных энергетических интервалов.

Так, для расчета пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе при нормальных условиях и энергиях  $4 \text{ МэВ} \leq R_\alpha \leq 8 \text{ МэВ}$  может быть использована следующая эмпирическая формула:

$$R_{\text{возд}, \alpha} [\text{см}] = 0,318 E_\alpha^{3/2} [\text{МэВ}], \quad (2.5)$$

а при энергиях  $R_\alpha \geq 8 \text{ МэВ}$  —

$$R_{\text{возд}, \alpha} [\text{см}] = \left( \frac{E_\alpha}{37,2} \right)^{1,8} [\text{МэВ}]. \quad (2.6)$$

Для протонов формула (2.2) приобретает вид

$$R_{\text{возд},\alpha} [\text{см}] = \left( \frac{E_p}{9.3} \right)^{1.8} [\text{МэВ}] \quad (2.7)$$

Пробег протона с энергией  $E_p$  в воздухе можно оценить через пробег  $\alpha$ -частицы:

$$R_{\text{возд},\rho} [\text{см}] = (R'_{\text{возд},\alpha} - 0.2), \quad (2.8)$$

где  $R'_{\text{возд},\alpha}$  — пробег  $\alpha$ -частицы с энергией  $E_\alpha = 4.01E_p$ .

Пробег тяжелой заряженной частицы в веществе с массовым числом  $A$  и плотностью  $\rho$  определяется через ее пробег в воздухе по формуле

$$R = 3.2 \cdot 10^{-4} \frac{R_{\text{возд}}}{\rho} \sqrt{A}. \quad (2.9)$$

Так, для сложного вещества со средним атомным номером  $\bar{Z}$ , средней атомной массой  $\bar{A}$  и плотностью  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>] пробег  $\alpha$ -частиц [см]:

$$\bar{R}_\alpha \approx 0.1 \frac{\bar{A} \sqrt{T_\alpha^3}}{\rho^3 \sqrt{\bar{Z}^2}} \quad (2.10)$$

А пробеги двух тяжелых заряженных частиц с разными массами  $m_1$  и  $m_2$  и зарядами  $z_1$  и  $z_2$  в одном и том же аморфном веществе связаны соотношением

$$\frac{R_2(E_2)}{R_1(E_1)} = \frac{z_1^2 m_2}{z_2^2 m_1}. \quad (2.11)$$

Если известен пробег  $\alpha$ -частиц в воздухе, то пробег  $R_a$  в другой среде может быть найден из равенства пробегов, выраженных в массовых единицах:

$$R_\alpha \rho = R_\alpha^{\text{матер}} \rho_{\text{матер}}, \quad (2.12)$$

где  $\rho$  и  $\rho_{\text{матер}}$  — соответственно плотности воздуха и среды. Более точные соотношения учитывают влияние природы вещества.

Рассчитывая пробеги и концентрации ионов в веществе, можно легировать одно вещество другим в необходимых пропорциях. Таким образом, облучая ускоренными ионами, сплавляют металлы, которые не смешиваются даже при использовании высоких температур.

Приведем пример конструкции установки для имплантации ионов (рис. 2.2). Основные ее блоки (рис. 2.2, а): источник ионов, ионный ускоритель, магнитный сепаратор, система сканирования пучком ионов и камера, в которой находится облучаемый образец. В качестве ускорителя часто используется электростатический ускоритель. Его основными элементами (рис. 2.2, б) яв-

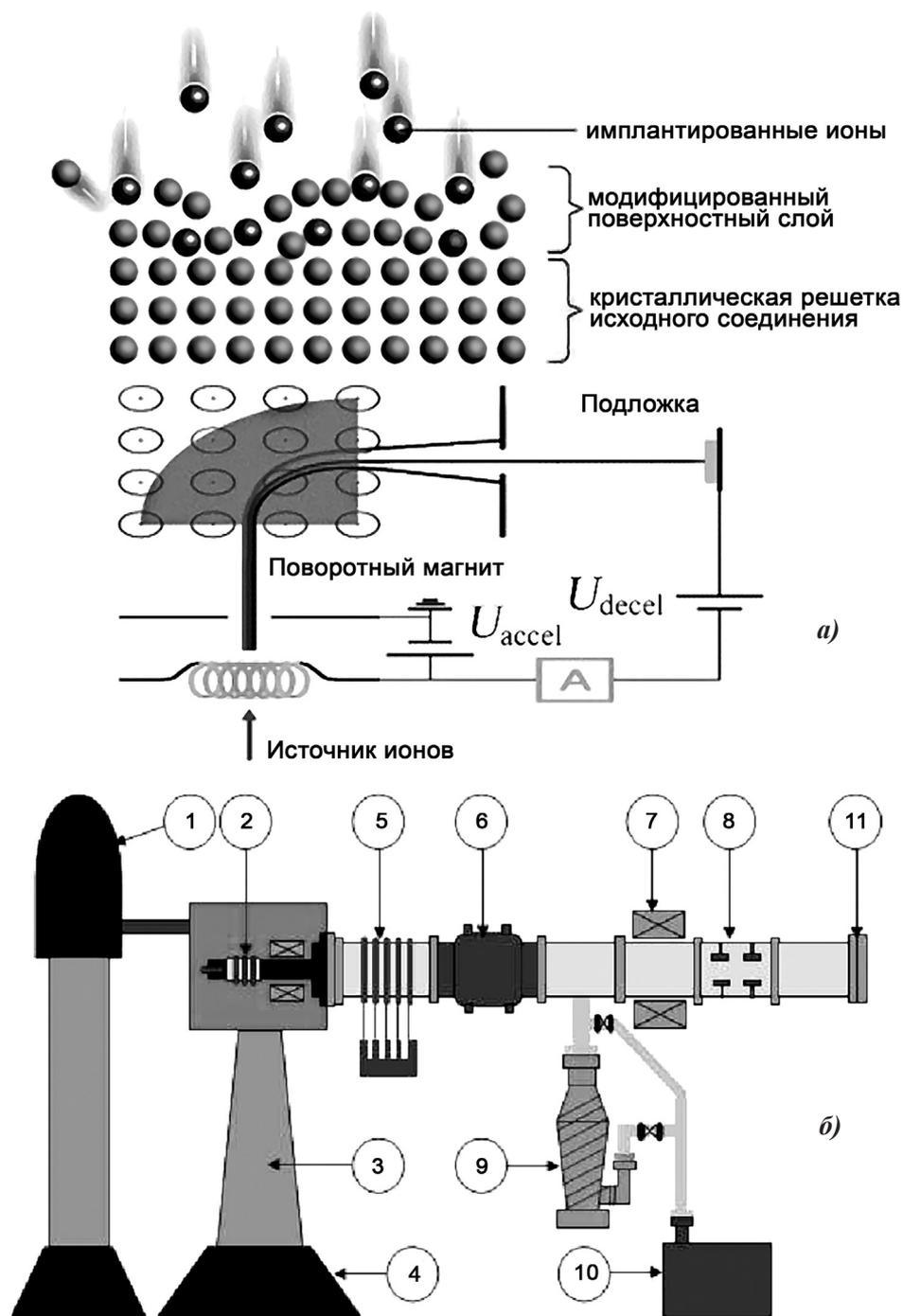


Рис. 2.2. Установка для имплантации ионов

ляются: источник высокого напряжения (1), источник ионов (2), система изоляторов (3), станина (4), ускоряющая секция (5), система квадрупольных линз (6), магнитный анализатор (7), система управления пучком (8), вакуумная система (9), мишень (10), подложка (11). Это обусловлено тем, что в нем достигается наилучшее энергетическое разрешение  $10^{-4}$ – $10^{-6}$ . В нем ионы ускоряются до энергий 10 кэВ — 5 МэВ. Магнитный сепаратор представляет собой масс-спектрометр, что позволяет еще повысить монохроматичность пучка ионов. В принципе для этих целей может быть использован ускоритель ионов с худшим разрешением по энергии, но при этом сепаратор выделит меньшее число ионов для облучения образца.

На установке возможно создавать композиционные системы с уникальными структурами и свойствами, существенно отличными от свойств основной массы детали. Ионное легирование позволяет создавать слои толщиной менее 0.1 мкм, причем параметры пучка точно воспроизводятся для разных типов облучения. В металлургии для упрочнения поверхности стальных режущих инструментов (фрезы, сверла и др.) имплантируют ионы азота. Их имплантация предотвращает образование трещин на поверхности металла и повышает коррозионные свойства стали. Такой подход нашел применение в медицине, авиационной и космической промышленности. Весьма эффективна одновременная имплантация ионов различных атомов. Это важно, когда необходимо создать новые материалы.

**Создание новых материалов.** Для этой цели применяются низкоэнергетические пучки электронов, протонов и тяжелых ионов с энергиями от 10 до 500 кэВ, а в некоторых случаях до 5 МэВ. Глубина проникновения частиц в материал составляет 0.01–1 мкм. Необходимые для внедрения на квадратный сантиметр вещества потоки заряженных частиц составляют  $10^{11}$ – $10^{16}$  частиц, а достигаемые при этом токи пучка частиц составляют микроамперы.

При облучении пучками заряженных частиц поверхностей материалов под действием ядерных реакций происходят изменения в их структуре.

Кроме ионизации атомов возникают их перемещения в результате соударений, а также в результате ядерных реакций происходит образование новых атомов. Обычно материалы с большим количеством дефектов становятся менее прочными, хрупкими. Эти обстоятельства используются для определения радиационной прочности материалов, которые используются в условиях облучения, например, для военной техники, для электроники в спутниках и космических кораблях, для конструкций атомных реакторов.

Наличие дефектов играет положительную роль при создании новых полупроводников. Облучение некоторых сплавов улучшает механические свойства материалов, например их прочность. Пучки применяются при создании интегральных схем в микроэлектронике. Улучшение энергетического

разрешения пучка позволяет уменьшать размеры микросхем, осуществляя прецизионный микроскопический рисунок электронных схем.

Например, рентгеновское излучение, электронные и ионные пучки находят применение в литографии — при изготовлении кремниевых интегральных схем. Первые два вида излучения обеспечивают высокое разрешение (до  $\sim 0.1$  мкм).

**Интегральные схемы.** Имплантацией ионов создают интегральные схемы, имеющие малые размеры. Они заменяют десятки тысяч транзисторов, диодов и резисторов. Этот технологический процесс называют литографией. Основное ее назначение — изготовление структур микросхем<sup>73</sup> — получение на поверхности пластин контактных масок с окнами, соответствующими топологии формируемых технологических слоев, и дальнейшая передача топологии (рисунка) с маски на материал данного слоя.

Технология полупроводникового производства базируется в настоящее время на таких сложных прецизионных процессах обработки, как фото- и электролитография, оксидирование, ионно-плазменное распыление, ионная имплантация, диффузия, термокомпрессия и др.

Для осуществления большинства технологических операций используют уникальное по характеристикам оборудование: оптико-механическое, термическое, ионно-лучевое. Процессы осуществляются в специальных чистых помещениях с заданными влажностью и температурой.

Технологический маршрут — это последовательность технологических операций обработки полупроводниковых пластин.

1. Подготовка пластин. Исходные полупроводниковые пластины — эпитаксиальные структуры или монокристаллические подложки с электропроводностью  $n$ - или  $p$ -типа, полученные в качестве полуфабриката с завода-изготовителя, подвергают очистке, промывке.

2. Создание топологического рисунка. Чтобы в эпитаксиальной структуре сформировать области с электропроводностью  $p$ -типа, необходимо обеспечить проведение локальной диффузии через окна — отверстия в защитной маске.

3. Получение  $p$ - $n$ -перехода «база — коллектор». Для прецизионной дозировки количества вводимой в кристалл примеси — атомов бора при создании области  $p$ -базы — используют процесс ионной имплантации, заключающийся, как уже отмечалось, во внедрении ускоренных ионов в поверхность кристалла.

4. Получение слоя фоторезиста. Слой фоторезиста служит защитной маской, так как ионы, внедренные в фоторезист, не достигают поверхности диоксида. Чтобы сформировать базовую область и  $p$ - $n$ -переход «коллектор — база»

<sup>73</sup> Микросхемы делятся на малые (100 элементов), средние (1000 элементов), большие (10 000 элементов) и сверхбольшие (1 000 000 элементов и более).

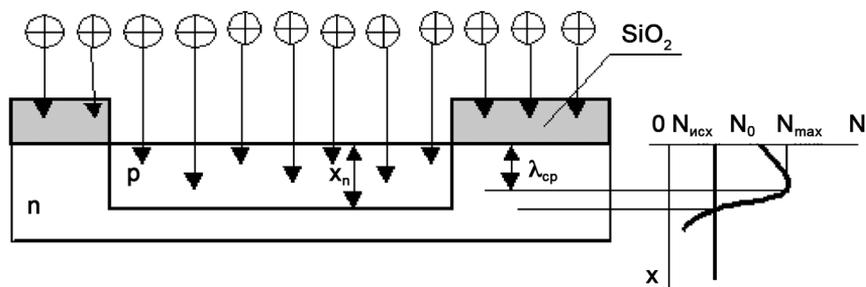


Рис. 2.3. Принцип ионной имплантации в элементы интегральных схем

на требуемой глубине, используют последующую диффузионную разгонку внедренных атомов бора.

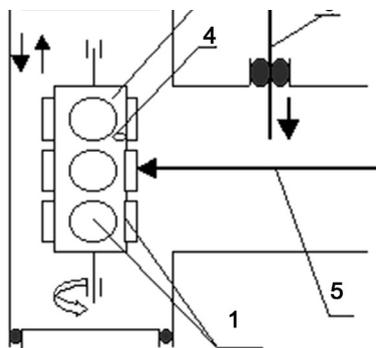
5. Получение *p-n*-перехода «эмиттер — база». Вначале формируют топологический рисунок эмиттерных областей, используя процесс фотолитографии по пленке SiO<sub>2</sub> над базовой областью.

6. Контактная металлизация. Для присоединения к областям эмиттера, базы и коллектора электрических выводов необходимо металлизировать поверхности контактов.

Для создания подложек и слоев интегральных схем в результате ионной имплантации атомы легирующей примеси сначала ионизируют в сильном электрическом поле. Затем сфокусированным потоком ионов облучают поверхность пластины с подготовленной заранее оксидной маской (рис. 2.3).

Имея при подлете к поверхности одинаковую энергию, ионы при вхождении в кремний испытывают многократные столкновения с ядрами и кулоновское взаимодействие с электронами атомов кремния. Это приводит к постепенному торможению ионов вплоть до полной остановки. Путь, пройденный отдельным ионом в кристалле кремния (длина пробега), является величиной случайной и для совокупности ионов, внедренных в кристалл, оценивается средним значением пробега  $l_{ср}$ .

Установка ионной имплантации в пластины интегральных схем представляет собой вакуумную камеру, состоящую из ряда блоков, последовательно состыкованных с помощью уплотнений из вакуумной резины. Из источника примесь в парообразном или газообразном виде попадает в разрядный блок (ионизатор), из которого отрицательным потенциалом в 20–25 кВ ионы вытягиваются в магнитный сепаратор — масс-анализатор (рис. 2.2). Здесь в постоянном магнитном поле происходит разделение траекторий ионов с различным электрическим зарядом так, что в следующий блок проходит моноэнергетический поток ионов (с расчетным значением энергии). В этом блоке с помощью системы электродов ионному пучку придается плоская (ленточная) форма, и в следующем блоке (ускорителе) ионы разгоняются до необходимой энергии. В рабочую камеру, таким образом, проходит



**Рис. 2.4.** Установка ионной имплантации

плоский (ленточный) ионный луч, неподвижный в пространстве.

Схема рабочей камеры (последнего блока установки) приведена на рис. 2.4. Облучаемые пластины 1, несущие оксидную маску, размещаются по периферии держателя (контейнера) 2 в несколько ярусов. В процессе облучения пластин неподвижным ленточным пучком электронов 5 контейнер вращается и совершает возвратно-поступательное движение. Пластины, таким образом, постепенно набирают необходимую дозу легирования.

Между пластинами располагаются датчики 4, принимающие ту же дозу заряда, что и пластины. По достижении необходимой дозы системой контроля вырабатывается сигнал, отключающий ионный пучок. Перед выгрузкой контейнера с обработанными пластинами вакуумный затвор 3 отсекает рабочую камеру от остального объема установки, камеру открывают и производят замену контейнера с пластинами. После закрытия камеры и открывания затвора вакуумные насосы восстанавливают рабочее давление ( $\sim 10^{-4}$  Па) в объеме установки и начинается следующий цикл обработки. Технические характеристики установки ионной имплантации «Везувий-9» представлены в табл. 2.4.

**Таблица 2.4**

**Характеристики установки ионной имплантации «Везувий-9»**

Тип разрядной камеры	магнетронный
Максимальный ток разряда, А	5
Максимальное напряжение разряда, В	500
Напряжение экстракции ионов, кВ	25
Напряженность магнитного поля масс-спектрометра, А/м	$24 \cdot 10^4$
Угол поворота ионного пучка, град	110
Радиус равновесной траектории, м	0.3
Максимальный ионный ток, мкА	600
• до 2-зарядных ионов	150
• до 3-зарядных ионов	
Максимальное ускоряющее напряжение, кВ	600
Количество пластин, обрабатываемых в одном цикле, при диаметре пластин, шт	54
• 75 мм	36
• 100 мм	

Скорость движения контейнера с пластинами	20
• вращательного, об./мин	6
• возвратно-поступательного, цикл/мин	
Предельный вакуум в рабочем объеме установки, Па	$6.5 \cdot 10^{-4}$

## 2.2. Неразрушающий контроль<sup>74</sup>

Как отмечалось выше, в неразрушающем контроле работает более 2000 ускорителей. Для неразрушающего контроля применяют пучки рентгеновского,  $\gamma$ -излучения от радиоактивных источников и ускорителей электронов с энергией 25–30 МэВ, а также нейтронные пучки, получаемые как на ускорителях протонов с энергией 2.5 МэВ, так и в реакторах. У нас в стране на 1 января 2016 г. действует 8294 рентгеновских дефектоскопа и 1453  $\gamma$ -дефектоскопа.

**Радиография.** Неразрушающий контроль относится к видам проверки материалов и оборудования, методы которых не изменяют структуру, свойства и рабочие характеристики исследуемого объекта. Одной из ключевых технологий неразрушающего контроля<sup>75</sup> является рентгенография<sup>76</sup> или радиография<sup>77</sup>. Второе понятие включает в себя первое. Если рассматривать разные способы получения ионизирующего излучения, способы проведения неразрушающего контроля включают в себя рентгенографию, гамма-графию, протонную, нейтронную и даже позитронную радиографию.

Их смысл заключается в сканировании изделия, с целью обнаружения в нем дефектов, пучками различных типов ионизирующих излучений, источника которых могут быть рентгеновские трубки, ускорители и радионуклиды.

Сечение взаимодействия фотонов с веществом объекта зависит от энергии пучка, плотности и атомного номера вещества. Радиационный неразрушающий контроль основан на законе экспоненциального ослабления интенсивности пучка ионизирующего излучения (рентгеновского,  $\gamma$ - и нейтронного излучений) в зависимости от толщины  $x$  объекта:

<sup>74</sup> С 1920-х по 1950-е гг. был получен опыт практического применения рентгеновских трубок и  $\gamma$ -источников для обследования сварочных швов и изделий литья. Разработаны первые методики контроля изделий. С 1950-х гг. для этих целей стали использовать линейные ускорители. В 1960–1980 гг. наработаны методики неразрушающего контроля для разных отраслей.

<sup>75</sup> Неразрушающий контроль может осуществляться нерадиационными методами: визуально-оптическим, люминесцентно-красочным, люминесцентно-порошковым, магнитнопорошковым, электроиндуктивным и ультразвуковым.

<sup>76</sup> Рентгенография — исследование внутренней структуры объектов, просцируемой при помощи рентгеновских лучей на специальную пленку или бумагу.

<sup>77</sup> Радиография — метод исследования структуры объектов (изделий, сплавов, биологической ткани и др.), когда изображение получают путем регистрации их собственного или наведенного радиоактивного излучения, а также при просвечивании внешними источниками ионизирующих излучений.

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (2.13)$$

где  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления,  $I_0$  — интенсивность излучения при  $x = 0$  на входе в среду.

При прохождении через изделие, подвергающееся неразрушающему контролю, пучков фотонов или нейтронов они частично поглощаются и частично рассеиваются. Степень ослабления пучка зависит от толщины объекта и наличия в нем дефекта.

В неразрушающем контроле применяют рентгеновскую, нейтронную, протонную и  $\gamma$ -радиографию.

### Рентгеновская радиография.

На рис. 2.5 представлена простейшая схема рентгеновского неразрушающего контроля. Пучок рентгеновских лучей  $\beta$  проходит сквозь исследуемый объект 5. После объекта поток рентгеновского излучения изменяется по плотности 4 и регистрируется детектором излучения 2. На детектирующей пленке отображается дефект 3, существующий в исследуемом образце 1. Чувствительность методов, основанных на использовании рентгеновского и  $\gamma$ -излучений, составляет соответственно 1.5–3 и 4–6% от толщины детали.

### Нейтронная радиография.

Физической основой нейтронной радиографии является зависимость интенсивности излучения от химического состава вещества, и прежде всего от его атомного номера и массового числа. В отличие от рентгеновского и  $\gamma$ -излучений, эта зависимость для нейтронов выражена более сильно. Большое значение нейтронной радиографии состоит в возможности раздельного контроля химических компонентов материала. Напри-

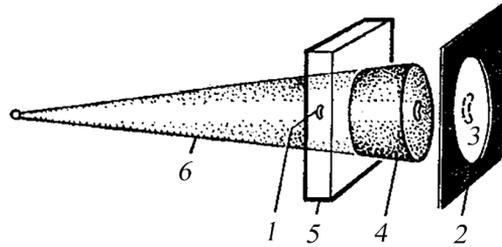


Рис. 2.5. Общая схема системы рентгеновского неразрушающего контроля: 1 — дефект, 2 — детектор излучения, 3 — изображение дефекта на детектирующей пленке, 4 — поток рентгеновского излучения после прохождения объекта, 5 — объект, 6 — рентгеновское излучение

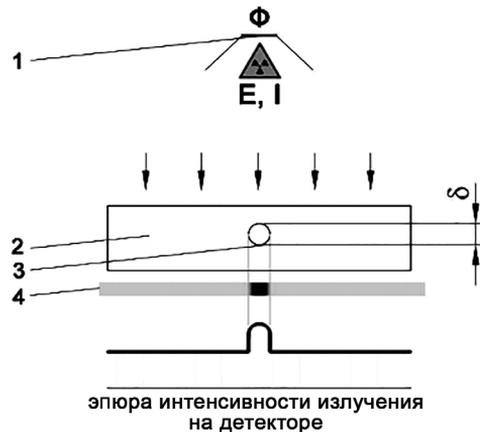
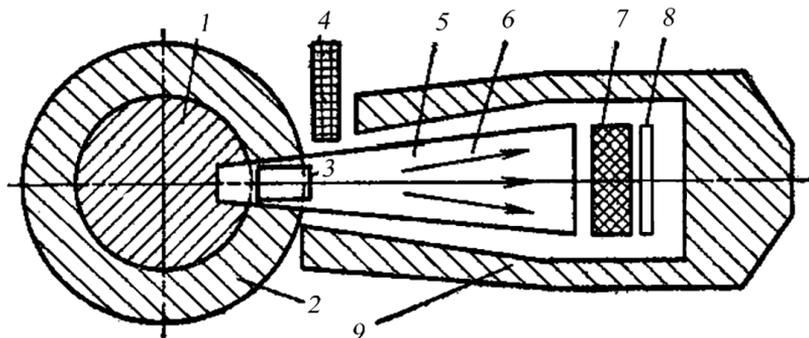


Рис. 2.6. Пример изменения интенсивности пучка рентгеновского излучения  $I$  на детектирующей пленке 4 при наличии в образце 2 дефекта (воздушной раковины) 3

мер, с использованием обычных методов контроля нельзя даже обнаружить наличие легких или органических материалов на стали при близких толщинах, а нейтронная радиография позволяет контролировать детали размером  $\approx 1$  мм из органических материалов сквозь слои металлов толщиной в сантиметры. Это позволяет применять нейтронную радиографию при контроле композиционных материалов. В зависимости от решаемой задачи поток нейтронов получают от мало мощных радиоизотопных источников или устройств типа ядерных реакторов. Нейтроны необходимых энергий выделяются с помощью металлических фильтров. Ввиду сильного взаимодействия нейтронов с водородосодержащими материалами и другими элементами с малыми атомными номерами следует обращать внимание на используемое оборудование, приспособления и тщательно готовиться к нейтронной радиографии.

В нейтронной радиографии облучение объекта пучком нейтронов происходит примерно так же, как и пучком рентгеновского излучения, и регистрация изображения объекта осуществляется рентгеновской пленкой или другим детектором. На рис. 2.7 представлена схема просвечивания при нейтронной радиографии. Основной ее элемент — источник медленных нейтронов 1, окруженный защитой 2. Диафрагма 3 формирует распределение нейтронов, а затвор 4 представляет защиту от нейтронов в нерабочем состоянии установки. Коллиматор 5 формирует пучок нейтронов 6, который попадает на обследуемое изделие 7, за которым располагаются детектирующие пленки 8. Система помещается в защитную камеру 9.

**Протонная радиография** основана на использовании потока протонов для неразрушающего контроля и базируется на особенностях распространения и взаимодействия их с веществом. Источниками протонов служат, как правило, ускорители. Особенностью применения протонной радиографии является контроль тонких изделий или их частей (листы, фольга и т.п.), поскольку протоны поглощаются сравнительно тонкими слоями. В отдельных



**Рис. 2.7.** Схема просвечивания при нейтронной радиографии: 1 — источник медленных нейтронов, 2 — защита, 3 — диафрагма, 4 — затвор, 5 — коллиматор, 6 — пучок нейтронов, 7 — изделие, 8 — детектор, 9 — камера

случаях протонная радиография обеспечивает более высокую чувствительность ( $\approx 0.1\%$ ) по сравнению с рентгенографией.

Данный метод контроля может быть применен для определения накопления усталостных напряжений в металлах до появления усталостных трещин, нахождения величины и степени пластической деформации. Контроль основан на том, что в начальной стадии усталостных явлений, когда образуются дислокации, в их области возникают отрицательные заряды. Позитроны, облучающие металл, притягиваются к областям расположения дислокаций и взаимодействуют с электронами. При аннигиляции позитрона и электрона возникает два  $\gamma$ -кванта, разлетающихся в строго противоположных направлениях. По количеству  $\gamma$ -квантов и среднему времени жизни позитронов можно определить точку, из которой они вылетают, и начало усталостных нарушений в металле.

**Гамма-радиография.** Физическая идея неразрушающего контроля с использованием  $\gamma$ -излучения заключается в том, что сечения фотоядерных реакций на разных химических элементах различаются между собой. Они существенно различны на одном и том же элементе при различных энергиях фотонов. Если, например, в металле образовалась воздушная раковина, то поглощение фотонов в этой области будет существенно меньше. Детектор, расположенный с другой стороны образца, это регистрирует. Чтобы определить форму полости, ее надо облучить с разных сторон. Этот принцип относится к томографии. Наличие любого объекта вместо воздуха с плотностью, большей или меньшей плотности металла, также можно различить по числу поглощенных фотонов. Коэффициент поглощения фотонов веществом  $\mu$  зависит от сечения фотоядерной реакции  $\sigma$  и плотности вещества  $\rho$ :

$$\mu = \sigma\rho. \quad (2.14)$$

Принцип построения изображения внутреннего строения образца, как и при компьютерной томографии, основан на использовании программного обеспечения для визуализации изображений и построения трехмерной картины внутренней структуры объекта.

В настоящее время оборудование и методы радиографии применяются для проверки изделий в авиационной, ракетно-космической, автомобильной, химической, нефтегазовой промышленности, в области атомной, тепловой и гидроэнергетики, а также микроэлектроники. Так осуществляется контроль сварных швов, лопаток турбин, твердотельного ракетного топлива, строительных конструкций, печатных плат и др.

Радиографический контроль применяют для сварных соединений с целью выявления в соединениях трещин, непроваров, пор, шлаковых, окисных и других включений. Для трещин на глубине до 4 мм заметны непровары размером до 0.1 мм, от 4 до 10 мм — 0.2 мм, а на глубине свыше 20 мм — 0.5 мм.

В настоящее время в неразрушающем контроле для исследования небольших объектов продолжают эффективно использоваться рентгеновские трубки, в том числе и для обследования изделий из стали толщиной 10 см. В диапазоне толщин до 30 см применяются линейные ускорители с энергией 1–10 МэВ. Объектами обследования для линейных ускорителей являются части турбин, двигателей, тяжелого литья. Для контроля твердого материала сложных и крупных конструкций (элементов мостов, строений и т. д.), ракетного топлива, деталей для самолетов и судов применяются высокоэнергетические ускорители с энергией 15 МэВ. Они позволяют обследовать объекты толщиной до 45 см.

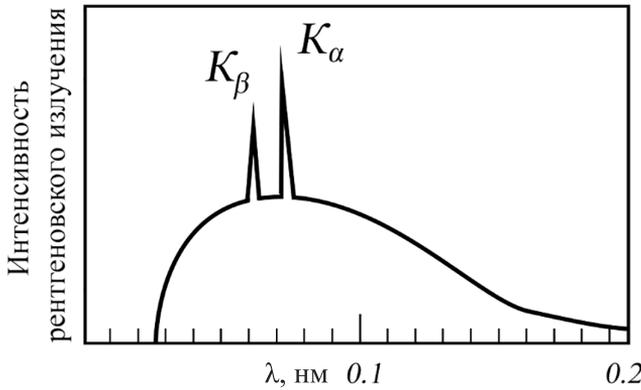
**Анализ структуры материалов.** Смысл различных видов анализа состава материалов с использованием ускоренных пучков заряженных частиц, получившего название радиоактивационного анализа, заключается в определении содержания в веществе различных примесей других химических элементов.

Радиоактивационный анализ осуществляется с использованием радиоактивных изотопов, реакторов или ускорителей. На ускорителях анализ проводится на тяжелых заряженных частицах, на быстрых и медленных нейтронах, на электронах и  $\gamma$ -квантах. Для этого вещество активируется и по активности определяется содержание каждого нуклида в веществе. Например, при облучении вещества  $\gamma$ -квантами образуются фотопики в энергетических спектрах. По их набору идентифицируется примесь другого вещества.

Для радиоактивационного анализа применяются различные ускорители. Наибольшее распространение получили высоковольтные ускорители и циклотроны, часто используемые в качестве генераторов быстрых нейтронов. Так, с помощью нейтронов с энергией 14 МэВ определяют содержание кислорода в металлах и сплавах. В поточных промышленных линиях они применяются для контроля за выполнением технологических процессов. Другой пример — использование ускорителя Ван-де-Граафа с энергией 2.5 МэВ для удаления пузырьков азота внутри стекла.

Среди ускорителей электронов для радиоактивационного анализа металлов на наличие примесей азота, кислорода, углерода и других элементов используются бетатроны, микротроны и линейные ускорители с энергией 25–30 МэВ. Например, для анализа примесей кислорода в металлах (Fe, Mo, Nb) используется реакция  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ . Ускорители активно применяются в экологии для контроля за загрязнением окружающей среды. Например, с помощью фотоядерных реакций на примесях воздуха оценивается степень вредности аэрозолей для человека или оценивается содержание в различных сортах табака канцерогенных веществ, например мышьяка. Также исследуют наличие различных вредных веществ в эмали зубов, например, попадание в пищу свинца, образующегося при сгорании бензина.

Чувствительность к определению примесей в изучаемом образце на быстрых нейтронах составляет  $10^{-2}$ – $10^{-4}\%$ , на фотонах —  $10^{-6}$ – $10^{-8}\%$ .



**Рис. 2.8.** Спектр характеристического рентгеновского излучения — переходы на  $L$ - и  $M$ -оболочки

**Рентгеновский эмиссионный анализ.** Другим способом определения состава вещества, основанным на процессах возбуждения атомов, является рентгеновский эмиссионный анализ. Он заключается в том, что при облучении вещества различными ионизирующими излучениями возникает характерное для каждого вещества рентгеновское излучение. На гладкий рентгеновский спектр накладываются максимумы. Их энергетическое положение и интенсивность определяются положением энергетических уровней и других квантовых характеристик. Для каждого типа атомов максимумы имеют строго определенное положение. Поэтому по ним может определяться тип вещества. Такой линейчатый спектр электромагнитного излучения атома, вызванный квантовыми переходами на внутренние оболочки атома ( $K$ -,  $L$ -,  $M$ -,  $N$ -,  $O$ -оболочки), называют характеристическим (рис. 2.8). По нему можно идентифицировать тип вещества и его концентрацию. Возбуждение атомов вещества осуществляется рентгеновским излучением,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучениями от радиоактивных изотопов, а также электронами, протонами и тяжелыми ионами, получаемыми на ускорителях. Энергии частиц, достаточные для проведения рентгеновского эмиссионного анализа, составляют несколько МэВ.

Такой тип анализа используют для исследования примесей в биологических образцах, например уровня свинца в крови жителей загрязненных районов, наличия ртути и свинца или других вредных элементов в волосах человека.

### 2.3. Ускорители для безопасности и обороны

Во многих странах мира с каждым годом усиливаются меры по обеспечению безопасности граждан. Значительные усилия направлены на обеспечение безопасности в аэропортах, морских портах и сухопутных пограничных пропускных пунктах. Эти меры возникли в ответ на усиление терроризма.

В связи с этим установлен жесткий контроль, особенно при авиаперевозках, борьбе с контрабандой грузов, незаконной миграцией, выявлении террористической деятельности. Так, при контрабанде с каждым годом все больше усложняются технологии переправки грузов через границу. Естественно, это вызывает ответное развитие технологий досмотрового контроля и безопасности.

Рентгеновские лучи показывают очертания груза внутри контейнера, но они не предоставляют подробную информацию о материале, из которого он изготовлен, или данные о его радиоактивности. Их проникающая способность и интенсивность зависит от плотности вещества. Чем выше плотность, тем меньше рентгеновского излучения он пропускает через себя при использовании рентгеновских технологий. Поэтому нельзя установить, есть ли разница между, например, блоком двигателя и радиоактивным веществом.

Одним из методов борьбы с такими угрозами является использование ионизирующего излучения, получаемого на ускорителях электронов. Он основывается на выявлении небольших количеств особых ядерных веществ в морских контейнерах с помощью реакций, вызванных излучением. Любой радиоактивный материал испускает характеристическое рентгеновское излучение определенной частоты. Таким образом, облучая его пучком ионизирующего излучения, можно активировать и по частоте испускаемого характеристического рентгеновского излучения определить вещество. Поэтому ускорители занимают важное место при разработке методов досмотра.

Кроме того, представляют интерес для безопасности и обороны методы дистанционного досмотра посредством электромагнитного излучения. Работки в области лазерного терагерцового излучения дают возможность выявления на необходимом расстоянии от груза самодельных взрывных устройств или биологического оружия.

**Таможенный досмотр.** Через пропускные таможенные пункты проходит огромное количество транспорта и контейнеров. Их ручной досмотр — длительная и дорогостоящая процедура, чаще он применяется к грузам, вызывающим подозрение. Для увеличения скорости досмотра, возможности быстро и эффективно посмотреть внутрь контейнера без его вскрытия и проанализировать его содержимое созданы и постоянно совершенствуются досмотровые комплексы. Одной из важнейших задач государства с целью обеспечения безопасности его границ является обеспечение таможенной службы такими комплексами. В нашей стране на таможах развернуто более 70 таких комплексов. Досмотровые комплексы действуют не только в таможенных службах, но и широко применяются на промышленных предприятиях для контроля качества выпускаемой продукции.

Рентгеновских досмотровых комплексов в нашей стране на 1 января 2016 г. действует 3632, в том числе на промышленных предприятиях 517, в таможнях — 1004. Линейных ускорителей электронов на таможнях установлено 39.

По данным корпорации Росатом, объем мирового рынка досмотровых систем и неразрушающего контроля в 2012 г. составил \$2.9 млрд, а в нашей стране — \$47.7 млн. По прогнозам агентства Homeland Security Research Corporation (HSRC), мировой рынок таких систем к 2020 г. достигнет \$2.5 млрд, а по прогнозам корпорации Росатом — \$4.6 млрд (в нашей стране \$83 млн). Крупнейшие компании — производители досмотровых комплексов — Smiths Detection, Rapiscan, L3 Communication.

Радиационное излучение является эффективным инструментом при быстром сканировании объектов, предоставляя информацию об их содержании. Для того чтобы выяснить, требует ли подозреваемый объект дальнейшего изучения, необходимо использовать излучение, которое может проникать в материалы (как правило, не повреждая их), и получать с его помощью какой-то диагностический сигнал — анализ изображений или материалов.

Основными типами существующих досмотровых систем на базе радиационных технологий являются:

- рентгеновские сканеры, использующие эффект обратного рассеяния рентгеновских лучей. Особенностью таких сканеров является относительно низкая энергия излучения (50–450 кэВ). Такие сканеры используются для досмотра багажа пассажиров и почтовых отправок. Рентгенография является стандартной методикой скрининга при пограничном контроле;
- сканеры с использованием  $\gamma$ -излучения радиоактивных изотопов кобальта или цезия. Энергия излучения систем 1.17–1.33 МэВ. Такие системы используются для технического осмотра транспортных средств и неразрушающего контроля;
- досмотровые комплексы на базе линейных ускорителей. Энергия излучения систем 2–10 МэВ. Данные досмотровые комплексы используются для досмотра контейнерных грузов и технического осмотра транспортных средств. Последнее время стали использоваться ускорители с двумя энергиями, действующие по принципу рентгеновского томографа. Это позволяет получать более информативные данные о грузе.

Досмотровые системы и комплексы различаются между собой по трем основным характеристикам:

1. **Проникающая способность.** Для радиоактивных изотопов она не превышает 180 мм в стали, для ускорителей возможно достичь лучших показателей — до 460 мм в стали для энергии 10 МэВ.

2. **Контрастная чувствительность.** Она важна для того, чтобы была возможность различить подозрительные элементы и неопасные предметы между собой. Ее значения обычно составляют от 1 до 140 г/см<sup>2</sup>.

3. **Разрешение.** Для выявления небольшого количества запрещенных веществ, например, около 100 г в большом контейнере, разрешение играет большую роль.

В досмотровых комплексах всех типов используются фотоны разных энергий: от рентгеновских до  $\gamma$ -лучей высоких энергий.

Тормозные фотоны получают на линейных ускорителях электронов с энергиями 1–12 МэВ. Они возникают при торможении электронов внутри твердой мишени с высоким зарядом ядер. Максимальные размеры таких досмотровых комплексов обычно составляют от одного до нескольких метров. Они способны обеспечивать необходимую мощность дозы в соответствии с установленными требованиями для конкретного способа транспортировки и типов объектов, подлежащих досмотру.

Под действием фотонов происходят фотоядерные реакции в элементах, входящих в состав обследуемого объекта. В результате облучения происходит активация ядер вещества. Образуются дочерние ядра, имеющие определенный период полураспада. Некоторые такие пороги фотоядерных реакций и ядра (продукты активации) представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Примеры образования радионуклидов в реакциях ( $\gamma, n$ )

Элемент	Пороговая энергия, МэВ	Дочернее ядро	Период полураспада
$^{12}\text{C}$	18.6	$^{11}\text{C}$	20 мин
$^{14}\text{N}$	10.60	$^{13}\text{N}$	10.1 мин
$^{16}\text{O}$	15.70	$^{15}\text{O}$	2 мин
$^{27}\text{Al}$	13.10	$^{26}\text{Al}$	6.7 с
$^{28}\text{Si}$	17.20	$^{27}\text{Si}$	4 с
$^{54}\text{Fe}$	13.60	$^{53}\text{Fe}$	8.5 мин

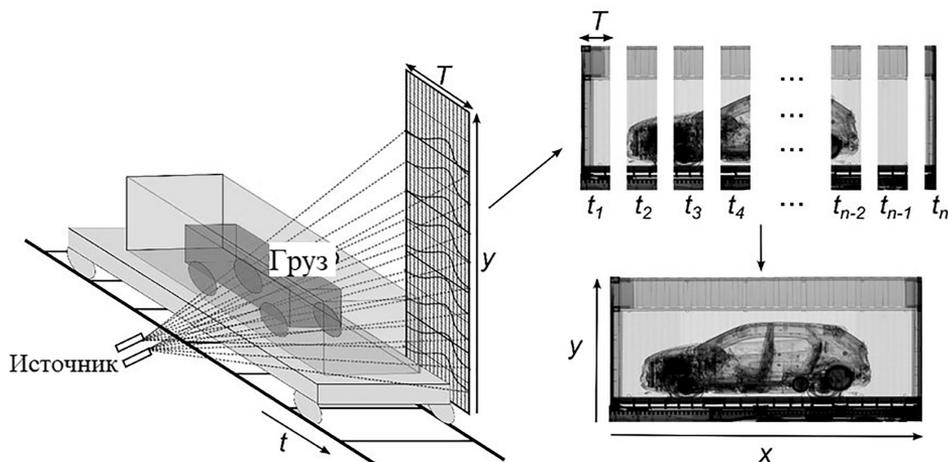
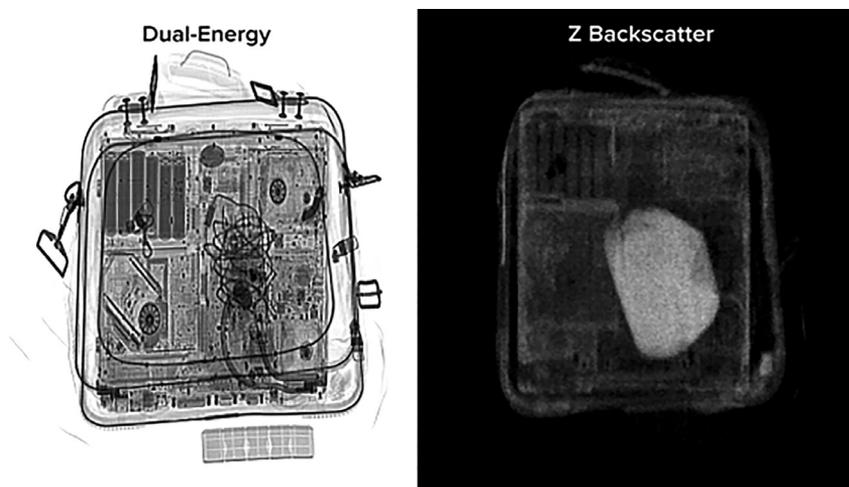


Рис. 2.9. Схема сканирования и первичной обработки изображения



**Рис. 2.10.** Пример изображения, получаемого на досмотровом комплексе: слева — с использованием дуальной энергии, справа — одиночной

Тормозные фотоны от одного или двух источников ионизирующего излучения сканируют по объему обследуемого объекта. Этот метод представлен на рис. 2.9. Продукты фотоядерных реакций регистрируются детектирующей системой, как в рентгеновском томографе. По отдельным снимкам восстанавливают форму объекта, находящегося внутри, например вагона.

Использование двух источников тормозного излучения разных энергий позволяет сделать снимки в разном энергетическом интервале. Восстановленное из них изображение оказывается существенно контрастней, и на нем видны более мелкие детали. На рис. 2.10 представлены результаты обследования при двух и одной энергии. Видно, что в первом случае можно различить множество деталей.

Механизм улучшения разрешения заключается в следующем. При сканировании большегрузного транспорта, такого как поезд или фуры с контейнерами, использование только лишь одной энергии может не дать желаемого результата. Интенсивность излучения в зависимости от пройденного расстояния в среде описывается выражением

$$I(Z, l) = I_0 e^{-\mu_z(E_\gamma)l}, \quad (2.15)$$

где  $I_0$  — начальная интенсивность,  $\mu_z(E)$  — линейный коэффициент поглощения в зависимости от энергии  $E_\gamma$ ,  $l$  — пройденное в веществе расстояние. Например, в том случае, если в контейнере из стали со стенками толщиной 20 см находится слой 8.4 см урана, они не будут различимы друг от друга на изображении, так как

$$\mu_{z_1}(E_\gamma)l_{z_1} = \mu_{z_2}(E_\gamma)l_{z_2}, \quad (2.16)$$

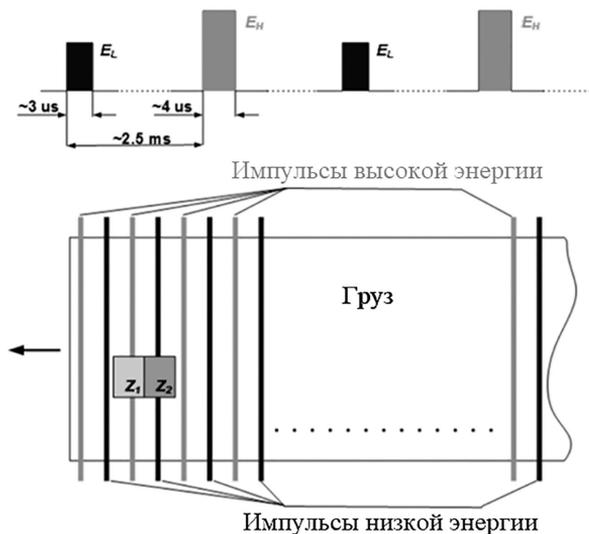
а следовательно, интенсивности после прохождения соответствующих слоев стали и урана будут одинаковы:

$$I(Z_1, l_{z_1}) = I(Z_2, l_{z_2}). \quad (2.17)$$

Для преодоления данной проблемы в ускорителе используют вторую энергию, отличающуюся от основной, что позволяет различить все материалы, и кроме того, появляется возможность разделения их по цвету в зависимости от  $Z$ .

Необходимым условием для использования двух энергий является скорость движения груза через сканирующую зону, так как при большой скорости не удастся достичь наложения снимков с разной энергией (рис. 2.11). Кроме того, использование только двух энергий хорошо подходит для выявления грузов в определенном интервале плотности.

В России высокоэнергетические досмотровые комплексы с использованием ускорителей были представлены в основном фирмой Varian (США), но в течение последних нескольких лет с 2014 г. проводится внедрение отечественных разработок фирмы Скантроник Систем (Россия). Для сравнения можно взять последнюю модель ускорителя Varian Linatron Mi6 и Скантроник УЭЛР-6-1-Д-4-01. Оба используют дуальную энергию для сканирования грузов. Из табл. 2.6 видно, что два ускорителя практически не различаются между собой по характеристикам. Совершенно очевидна разница в цене и техническом обслуживании в пользу отечественной разработки.



**Рис. 2.11.** Разделение высоко- и низкоэнергетических импульсов в течение сканирования с использованием дуальной энергии

Таблица 2.6

**Сравнение ускорителей с дуальной энергией Varian Linatron Mi6  
и Скантроник УЭЛР-6-1-Д-4-01**

Ускоритель	УЭЛР-6-1-Д-4-01	Linatron Mi6
Значение высокой энергии	6 МэВ	6 МэВ
Значение низкой энергии	3.5 МэВ	4 МэВ
Мощность дозы при высокой энергии	2.0 Гр/мин	8 Гр/мин
Мощность дозы при низкой энергии	2.0 Гр/мин	2,5 Гр/мин
Частота повторения при высокой энергии	200 Гц	300 Гц
Частота повторения при низкой энергии	200 Гц	300 Гц
Частота повторения при переключении энергии	2×200 Гц	300 Гц
Диапазон варьирования интервала между импульсами	200–495 мкс	50–400 мкс
Размер фокусного пятна	< 2 мм	< 2 мм
Вероятность пропуска импульсов	$\leq 5 \times 10^{-3}$	$\leq 1 \times 10^{-3}$
Утечка радиации	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
Угол раскрытия пучка в верхнем направлении	+33.5°	+22.5°
Угол раскрытия пучка в нижнем направлении	-17.7°	-7.5°



**Рис. 2.12.** Внешний вид ускорителей Скантроник УЭЛР-6-1-Д-4-01 — слева;  
Varian Linatron Mi6 — справа

**Технологии для обороны.** Пучки релятивистских электронов могут создавать электромагнитное излучение высокой мощности на различных частотах для специальных задач, где требуются концентрированные потоки энергии. Примером являются лазеры на свободных электронах, а также узконаправленные пучки  $\gamma$ -излучения на основе комптоновского рассеяния.

Лазеры на свободных электронах могут, в принципе, достигать средней мощности порядка мегаватт, а также качества оптического луча и длины волн, необходимых для достижения целей по безопасности и обороне. В середине 1990-х гг. самая высокая средняя мощность лазера достигала всего лишь 11 ватт. К XXI веку на таких лазерах достигли мощности 2.2 кВт, а в 2006 г. продемонстрирована мощность 14 кВт на длине волны 1.6 мкм.

Достижение уровня мощности порядка мегаватт в лазерах на свободных электронах требует развития двух основных разработок: мощной электронной пушки и инжектора непрерывного действия, который может работать неделями без остановки, а также создания мощных сверхпроводящих радиочастотных резонаторов, использующих высокотемпературные сверхпроводники.

Для обеспечения безопасности в последнее время растет спрос на изотоп  $^3\text{He}$  в связи с его использованием в нейтронных детекторах различных устройств для обнаружения специальных ядерных веществ. Основным источником изотопа  $^3\text{He}$  — побочные продукты использования ядерного оружия.

**Ядерная криминалистика.** В настоящее время в судебной ядерной экспертизе требуется интенсивное и долгое химическое разделение с помощью лабораторных масс-спектрометров или других инструментов для анализа данных. Сокращение времени экспертизы, а также перевод оборудования в мобильные лаборатории принесут большую пользу. Принципиальным ограничением масс-спектрометров, которое приводит к потребностям химического разделения, является ограничение динамического диапазона, т.е. возможности обнаружения следов очень малых концентраций одних веществ в присутствии больших количеств других составляющих. Использование технологий на базе ускорителей позволяет расширить этот диапазон. При работе в полевых условиях возрастают требования к улучшению надежности и прочности устройств, используемых для анализа данных.

**Создание экстремальных условий.** Для лабораторного моделирования экстремальных условий, при разработке новых видов ядерного вооружения создаются импульсные, как правило индукционные, ускорители с уникальными характеристиками (например, максимальной мощностью 100 ТВт, энергией импульса 25 МДж и максимальным током 30 МА). Экстремальные условия, создаваемые этими ускорителями, обеспечивают одноимпульсный режим работы и позволяют моделировать, например, условия ядерного взрыва. Индукционные ускорители с током порядка килоампер используются для оценки возможности распространения пучков заряженных частиц через атмосферу

для противоракетной обороны, чтобы управлять лазерами с длинами волн от 10.6 мкм до 8 мм, и для создания источников рентгеновских импульсов.

**Оружие на основе пучков протонов.** В последнее время расширяются исследования в области изучения пределов работы ускорителей, работающих при комнатной температуре. Важной их целью является увеличение полезного градиента ускорения частиц в обычных «теплых» высокоградиентных линейных ускорителях. Примером этого могут служить индукционные ускорители с диэлектрическими стенками, индукционные ускорители без сердечника или компактные резонансные ускорители протонов. Таким образом может быть достигнут ускорительный градиент порядка 100 МВ/м для коротких импульсов.

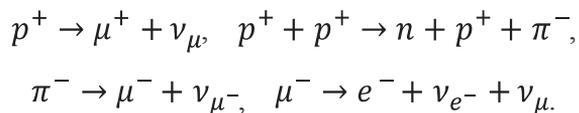
Такие технологии станут революционным технологическим прорывом. Это позволит также создать компактные системы протонной терапии для лечения рака, переносные ускорители протонов с энергией порядка ГэВ для дистанционного детектирования и малые электронные ускорители для компактных источников и лазеров на свободных электронах.

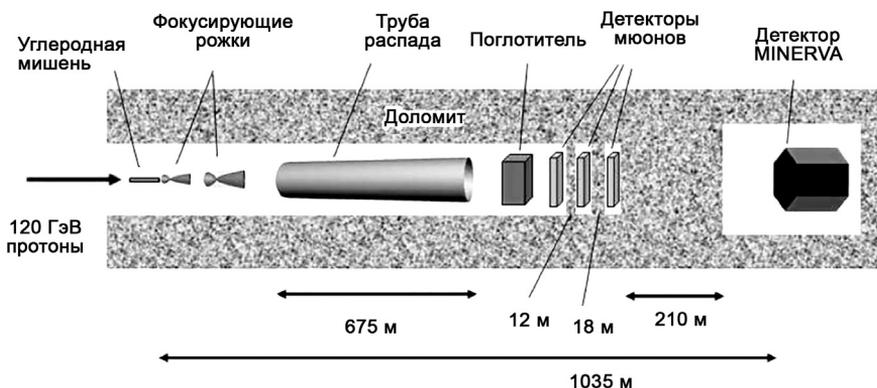
Это приведет к созданию компактных ускорителей, которые можно легко разместить на корабле или борту самолета.

Пучки протонов с энергией более 1 ГэВ могут пролетать расстояния в несколько километров без заметных потерь энергии. Ускорители на борту корабля или военного самолета смогут облучать объекты, расположенные на расстоянии более 1 км. Протоны с такой энергией порождают ливни других заряженных и незаряженных частиц, которые распространяются сквозь исследуемый объект. Объект может быть уничтожен пучками протонов, или они позволят обнаружить следы ядерных материалов, детекторы улавливают запаздывающие нейтроны и  $\gamma$ -излучение.

**Нейтринная связь.** В 2012 г. в Фермилаб на ускорителе Main Injector был проведен эксперимент по передаче информации с помощью пучка нейтрино. Была создана первая линия, состоящая из пучка нейтрино и детектора MINERVA. С ее помощью удалось передать информацию со скоростью 0.1 бит/с и ошибкой не более 1% на расстояние в 1035 км, из которых 240 м сигнал прошел сквозь толщу Земли. Эта демонстрация иллюстрирует возможность использования пучков нейтрино для обеспечения связи, не зависящей от любых существующих инфраструктур электромагнитной связи.

Упрощенная схема эксперимента представлена на рис. 2.13. Ускоритель создавал импульсы протонов с энергией 120 ГэВ длительностью 8.1 мкс каждые 2.2 с. Пучок протонов сталкивается с углеродной мишенью, образуя нейтрино в реакциях





**Рис. 2.13.** Схема эксперимента по передаче информации пучком нейтрино

Неоднородный пучок нейтрино проходит через 240 м горной породы, и все частицы, кроме нейтрино, поглощаются. Пучок состоит из мюонных нейтрино (88%), из мюонных антинейтрино (11%) и электронных нейтрино (1%). Энергетический спектр нейтрино имеет пик на 3.2 ГэВ и ширину приблизительно 2.8 ГэВ. Некоторые нейтрино достигают энергии 80 ГэВ, хотя 91.6% нейтрино в пучке имеют энергию менее 10 ГэВ. Пучок имел порядка нескольких метров в поперечном сечении непосредственно перед детектором.

В настоящее время ведутся модельные расчеты по использованию пучков нейтрино в космической связи, например с космическими станциями, расположенными на Луне или Марсе.

## 2.4. Электронная обработка<sup>78</sup> материалов

Основными областями применения электронно-лучевых технологий обработки являются:

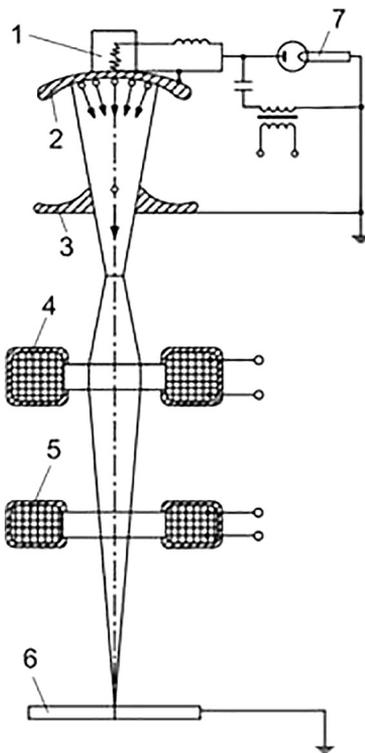
- стерилизация изделий медицинского назначения, лекарственных препаратов и сырья для них (шприцев, одноразовых медицинских инструментов, перевязочных материалов, перчаток, хирургических накладок, препаратов крови, тканей для трансплантации и т. п.);
- стерилизация и пастеризация продуктов питания с целью увеличения сроков их хранения для предприятий быстрого питания (школы, больницы, детские учреждения);

<sup>78</sup> Электронной или электронно-лучевой называют обработку, при которой для технологических целей используют острогофокусированный пучок электронов, движущихся с энергией до 200 кэВ. Для радиационной обработки материалов электронными пучками или тормозным излучением используется, как отмечалось выше, более 7500 ускорителей.

- стерилизация воды, непрерывных потоков разнообразных растворов, смесей, отходов больничных комплексов перед их захоронением и т.п.;
- модификация полимерных материалов и изделий;
- обезвреживание промышленных дымов от окислов серы, азота и токсических выбросов, обеззараживание сточных вод, стерилизация органических удобрений;
- дезинсекция зерна, круп и разнообразных специй;
- стерилизация древесины и деструкция целлюлозы;
- дезинсекция старинных изданий, архивов, уничтожение вирусов, бактерий в корреспонденции.

Метод электронно-лучевой обработки (ЭЛО) основан на использовании тепла, выделяющегося при резком торможении потока электронов на поверхности обрабатываемой заготовки. При электронно-лучевой обработке деталь помещают в герметичную камеру, в которой благодаря непрерывной работе вакуумных насосов обеспечивается высокая степень разрежения (до  $10^{-7}$  Па). Поскольку электроны не изменяют химических свойств твердого тела, то обработка ими в вакууме является существенным достоинством этого метода, так как при обработке не происходит химического загрязнения материала заготовки.

Свободные электроны для обработки материалов получают, например, при нагреве в вакууме металлической проволоки (танталовой или вольфрамовой). С ее поверхности излучаются электроны (этот эффект называют термоэлектронной эмиссией), число и энергия которых зависят от температуры нагрева. Кинетическая энергия этих электронов сравнительно невелика, причем они движутся в пространстве вокруг эмиттера в разные стороны. Воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между катодом и анодом, энергию электронов повышают и направляют их в определенном направлении. Это осуществляется в электронно-лучевой пушке, которая вместе с электронной оптикой создает сфокусированный пучок электронов, излучаемых катодом, ускоряемый в вакууме электрическим



**Рис. 2.14.** Схема электронно-лучевой пушки: 1 — катод; 2 — прикатодный электрод; 3 — ускоряющий электрод; 4 — магнитная линза; 5 — отклоняющая система; 6 — изделие; 7 — высоковольтный источник

полем с разностью потенциалов до 150 кВ. Скорость электронов при этом может достигать 100 тыс. км/с. Схема электронно-лучевой пушки, которая представляет собой ускоритель электронов низких энергий для обработки материала, представлена на рис. 2.14.

Электронная пушка или низкоэнергетический ускоритель (рис. 2.14) имеет катод 1, который нагревается до высоких температур током или бомбардировкой электронами вспомогательного катода. С нагретого катода эмитируются электроны. Прикатодный электрод 2 формирует электроны в пучок диаметром, равным диаметру ускоряющего электрода (анода) 3 с отверстием. Под действием электрического поля электроны ускоряются и, проходя отверстие в аноде, фокусируются магнитной линзой 4. Для перемещения пучка по поверхности обрабатываемого объекта 6 на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 5, отклоняющую пучок по любой траектории и с любой частотой. Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника 7 постоянного тока. Фокусировка электронов в пучок минимального размера происходит на некотором удалении от магнитной линзы, в области которой осуществляется электронно-лучевая обработка.

**Электронно-лучевая (электронная) сварка.** Для электронной сварки и резки различных материалов используется более 4500 тыс. низкоэнергетических ускорителей электронов с энергиями 20–200 кэВ.

Электронно-лучевая сварка осуществляется путем образования локализованного расплава на стыке двух материалов или деталей с последующим его затвердеванием и образованием неразъемного соединения. Это единственный вид сварки, позволяющий осуществить практически все виды сварных швов. Ширина швов составляет единицы микрометров. Глубина швов может значительно превосходить их. Для сварочных процессов используют электронные пушки небольшой мощности, обычно 1–3 кВт, а для сварки легированных сталей толщиной 150–200 мм мощность установок достигает 250 кВт.

Ускорители (рис. 2.14) используют для точного установления пучка по стыку при сварке, для интенсивного перемещения металла при сварке и металлургическом плавлении, для напыления путем отклонения пучка на значительное расстояние. Электроны фокусируются на маленькую площадку, сильно ее разогревая, так как их кинетическая энергия превращается в теплоту. Металл нагревается до очень высокой температуры и легко испаряется.

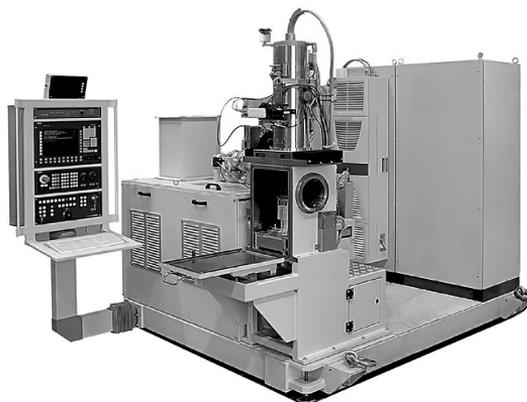
Для электронной сварки промышленностью выпускается большое количество ускорителей электронов высоковольтного типа с энергиями от 20 до 200 кэВ и токами от 0,3 мА до 1 А. На них удается достигнуть минимального пятна нагрева порядка  $10^{-7}$  см<sup>2</sup> при плотности энергии  $10^8$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Аналогичную плотность энергии удастся получить только с помощью лазерного луча. Такие параметры ускорителя используются для сварки тугоплавких и химически активных материалов. В промышленности такие установки выпускаются серий-

ным способом и используются в высокотехнологичных процессах в военной, космической, электронной промышленности.

Обработка с помощью острогофокусированных потоков электронов основана на интенсивном испарении материалов из зоны воздействия пучка с минимальным образованием жидкой фазы. Такой вид обработки используется для обработки изделий из таких материалов, как кремний, германий, керамика, ферриты, а также для создания покрытий из труднолетучих и тугоплавких материалов —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , стекла и карбидов тугоплавких металлов.

Кроме того, его применяют для подгонки электрических номиналов элементов схем. Мощность установок для этих целей в непрерывном режиме обычно составляет 1 кВт, а в импульсном 15 кВт. Энергии используемых электронных пучков составляют 100–175 кэВ, а вакуум внутри установки достигает  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Па.

Для повышения точности и качества обработки особые требования предъявляют к стабилизации ускоряющего и фокусирующих напряжений, силы токов питания фокусирующих и отклоняющих магнитных систем. На рис. 2.15 представлен внешний вид установки для электронно-лучевой сварки.



**Рис. 2.15.** Общий вид установки для электронно-лучевой обработки материала

## 2.5. Радиационное производство

Для этих целей используются низкоэнергетические высоковольтные и линейные ускорители электронов с энергией 150–500 кэВ и мощностью 300–350 кВт. Для облучения изделий в виде полых трубок используются ускорители электронов с энергией 1–3 МэВ, в случае пленок и лент — пучки с энергией 0.5–1.0 МэВ, а шин — пучки с энергией 0.8–1.0 МэВ. Радиационное производство включает в себя следующие процессы.

### 1. Радиационная полимеризация:

- радиационное модифицирование полимеров;
- радиационное отверждение покрытий под действием пучков электронов: полимерных покрытий (лакокрасочных, металлизированных, печатных красок

и др.), покрытий деревянных панелей и паркетных плиток, стеклотекстолита, массивных корпусов ракет;

- получение радиационно-сшитого пенополиэтилена (используется в строительстве, автомобилестроении, производстве спортивного оборудования, утеплителя, упаковочного материала);
- производство модифицированных пористых материалов (древесины, бетона, асбоцемента, древесно-пластмассовых и бетонно-полимерных материалов, армированных пластиков);
- радиационная прививочная полимеризация (такое сшивание применяется для отделки текстильных изделий для улучшения антибактерицидных свойств, прочности, термостойкости);
- производство термостойких самослипающихся электроизоляционных материалов (лент и резино-стеклотканей).

### **2. Радиационное модифицирование материалов:**

- производства кабелей и проводов с радиационно-сшитой (модифицированной) изоляцией;
- изготовление упрочненных и термоусаживающихся изделий (пленок, лент, мешков, трубок, труб, шлангов, манжет и изделий более сложной формы и конфигурации, применяющихся в электротехнической, автомобильной, пищевой промышленности, электронной технике, судостроении, строительстве);
- улучшение качества заготовок отдельных компонентов автомобильных шин — протекторов, каркасов, боковых стенок;

### **3. Радиационная деструкция.**

### **4. Изменение цвета изделий из драгоценных и полудрагоценных камней.**

### **5. Изготовление нанопорошков.**

### **6. Крекинг нефти.**

В некоторых отраслях промышленности объемы продукции, произведенной при использовании радиоактивных излучений, превосходят объемы обычной. Например, в Японии и Северной Америке более 90% автомобильных шин и более 60% кабельной продукции выпускается с использованием радиационных технологий. В начале 2015 г. в мире использовалось свыше 1500 ускорителей электронов только для радиационного модифицирования полимеров (ежегодный прирост около 100 штук). Треть ускорителей задействована для исследовательских целей и для создания инновационных технологий. В Китае ежегодно в строй вводятся более 50 ускорителей для радиационного производства.

## *2.5.1. Радиационная полимеризация*

Ионизирующее излучение используется для модификации полимеров, т. е. изменения их свойств при небольших дозах. Таких процессов и технологий

в промышленности реализовано много, и они успешно работают, а число новых технологий в разных отраслях промышленности постоянно растет.

**Радиационное модифицирование полимеров.** Процесс ионизации может происходить на атомном или молекулярном уровне. Под действием ионизирующих излучений может разрываться любая химическая связь и, как следствие, по всему объему могут идти любые химические реакции, как желательные, так и нежелательные. В радиационной химии чаще всего применяются радиоактивные источники или ускорители электронов с максимальной энергией не выше 10 МэВ (выше этой энергии происходит активация ядер). Практическое применение пучков электронов в радиационной химии следует отнести к радиационной модификации полимеров.

Модификация полимеров заключается в том, что под действием ионизирующего излучения происходит достаточное число сшивок полимерных цепей, т.е. образования трехмерных химических связей между соседними участками полимера. Эта процедура делает вещество нерастворимым в некоторых растворителях. Доля в производстве поверхностной термообработки пучками электронов низких энергий (70–300 кэВ) является самой быстрорастущей благодаря повышенной эффективности этого быстрого процесса и его экологичности. Это увеличивает срок службы полимера в присутствии воздуха при температуре 150 °С до 15 000 ч. Для этой цели используются ускорители с энергией 1.5 МэВ, на практике их применяются сотни.

Ионизирующее излучение способно вызывать полимеризацию без добавления катализаторов. Полимеризацию в жидкой и твердой фазе удобно осуществлять на ускорителях. Для этой цели используют высоковольтные и каскадные ускорители с энергией 3 МэВ. В настоящее время в радиационной химии для полимеризации материалов используются сотни ускорителей электронов.

Ионизирующее излучение применяется для модификации полимеров, в основном для сшивания их структуры. Сшивание используется в промышленных процессах, таких как модифицирование полиолефиновой, преимущественно полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляции кабелей и проводов, изготовление упрочненных и термоусаживающихся пленок, трубок и фасонных изделий, получение пенополиэтилена. Радиационное сшивание приводит к повышению их механической прочности, термостойкости, улучшению электроизоляционных свойств (особенно при высоких температурах).

**Радиационно-прививочная полимеризация.** Для улучшения свойств полимеров применяют радиационно-прививочную полимеризацию. Она заключается в том, что радиационная сшивка между компонентами разных химических соединений происходит по всему объему смеси. Этот метод наиболее часто применяется для получения гидрогелей на основе полиакриламида, поливинилового спирта и полиэтиленоксида. Преимуществом радиационного сшивания

является простота реализации его на ускорителях. Дозы, требующиеся для радиационной прививочной полимеризации, составляют 25–50 кГр, причем биосовместимость получаемых веществ зависит от мощности дозы во время прививки. Изменением величины и мощности дозы облучения создается возможность широкого регулирования густоты сетки привязки компонентов гидрогеля. Одновременно с радиационной привязкой происходит стерилизация получаемого продукта. Его можно использовать при пониженных температурах. Радиационно-сшитые гидрогели используются в качестве имплантатов, глазных линз, медицинских мембран, перевязочных материалов и т. д.

Метод радиационной прививки широко используется в биотехнологиях и при производстве лекарств в фармацевтической промышленности. Прививочная полимеризация является широко распространенным радиационным методом получения биосовместимых материалов. Ее применяют для получения имплантатов, например, для лечения пораженных участков кожи и для создания протезов. Такие имплантаты хорошо совместимы с кровью и не вызывают воспалений, поэтому успешно применяются в хирургии.

Радиационно-прививочную полимеризацию гексафторпропилена используют для получения на  $\gamma$ -установке  $^{60}\text{Co}$  медицинских мембран, имеющих поры в результате двухстороннего модифицирования пленки с внешним диаметром 0.3 мкм, внутренним диаметром 0.05–0.1 мкм. Однако степень прививки в этом случае невысока и не превышает нескольких процентов даже при дозе облучения порядка 300 кГр. Она также применяется для уменьшения растворимости биоактивного вещества с целью пролонгации его действия, придания материалу необходимой формы и размеров. Для повышения стабильности при действии тепла и химических реагентов используется иммобилизация биоактивных веществ (антибиотиков, антител, антигенов, противораковых препаратов, бактериальных клеток и т. д.).

**Радиационное отверждение<sup>79</sup> покрытий** используется в промышленности многих стран. Суть такого подхода заключается в том, что при столкновении с пучком ионизирующего излучения частицы нанесенного покрытия проникают вглубь вещества. Этот способ обладает преимуществами перед термохимическим отверждением: прежде всего существенно меньшим расходом электроэнергии (до 80 раз), уменьшением площади используемых производственных помещений, осуществляется при комнатной температуре. Кроме того, радиационное отверждение — более экологически чистый процесс и один из самых быстрых способов отверждения лакокрасочных покрытий: от долей секунды до нескольких секунд.

<sup>79</sup> **Отверждение** — действие, в результате которого происходит необратимое превращение жидких реакционноспособных олигомеров и (или) мономеров в твердые неплавкие и нерастворимые сетчатые полимеры. Под действием облучения происходит сополимеризация олигомеров и мономеров.

К настоящему времени разработаны и внедрены в промышленность технологии радиационного отверждения различных полимерных покрытий (лакокрасочных, адгезионных, магнитных, металлизированных, печатных красок и др.) на многих поверхностях (деревянных, металлических, керамических, каменных, бумажных, полимерных, на магнитных дисках, массивных корпусах ракет и др.).

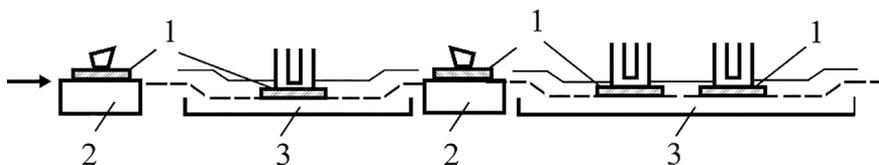
Наиболее широкое применение получило отверждение ускоренными электронами (как правило, используются среднеэнергетические ускорители с энергией до 500 кэВ), которые широко используются для обработки поверхностей. Среди них широко известны ускорители прямого действия «Электрон», «Аврора», «Ион», КГЭ-2.5, ЭОЛ мощностью от 1 до 25 кВт. Получаемые на этих ускорителях электроны обладают низкой проникающей способностью. Поэтому их используют для отверждения покрытий толщиной менее 500 мкм. При этом остаточной радиации не возникает.

Большинство покрытий удовлетворительно отверждается при дозах 80–140 кГр и энергии электронов 300–500 кэВ. Более высокие дозы излучения могут приводить к деструктивным процессам как покрытия, так и материала подложки (древесина, бумага, пластмассы). При этом возможно изменение цвета и ухудшение механических свойств.

Основными преимуществами радиационного отверждения являются высокая энергетическая эффективность, снижение или полное исключение испарения продуктов, высокая производительность процесса, комнатная температура отверждения.

Покрытие и последующая обработка древесных материалов пучками электронов или рентгеновских лучей повышают их стойкость по отношению к влаге, грибкам и плесени, а также улучшают прочность. Частицы покрытия при радиационной обработке глубже проникают в деревянное изделие. Подобные процессы обработки требуют меньших затрат энергии и в меньшей степени загрязняют среду летучими органическими соединениями, чем обычные химические процессы обработки.

Технологические линии для получения покрытий с применением электронного облучения включают оборудование для нанесения лакокрасочного материала и отверждения покрытия, а также скоростной конвейер (рис. 2.16). Более применимы для получения покрытий плоские изделия — рулонные и листовые материалы. Максимальное расстояние между покрытием и окном, в котором расположен источник электронов, не должно превышать 10–15 см. Это затрудняет отверждение покрытий на изделиях сложной формы. В промышленных условиях радиационное отверждение применяют при отделке щитовой мебели, печатных плат, облицовочных строительных плит, листового и рулонного металла, картона, плоских изделий из пластмасс при скоростях движения конвейера (или ленты) 10–60 м/мин.



**Рис. 2.16.** Технологическая линия для получения покрытий на щитовых деталях мебели: 1 — деталь мебели; 2 — лаконоливающая машина; 3 — радиационно-химическая установка с ускорителями электронов

Энергозатраты при использовании радиационного отверждения при отделке мебельных щитов (по сравнению с терморadiационным отверждением) сокращаются в 6–9 раз, затраты труда — в 6–14 раз, стоимость покрытий в целом снижается примерно в 2 раза. Следует отметить, что электронное отверждение рентабельно только при объемах производства покрытий более 20 тыс. м<sup>2</sup>/год. Приведем еще пример: предприятие, изготавливающее металлические или алюминиевые листы, на сушку обработанных поверхностей тратит в 20 раз больше электроэнергии, чем при использовании ускорителей электронов.

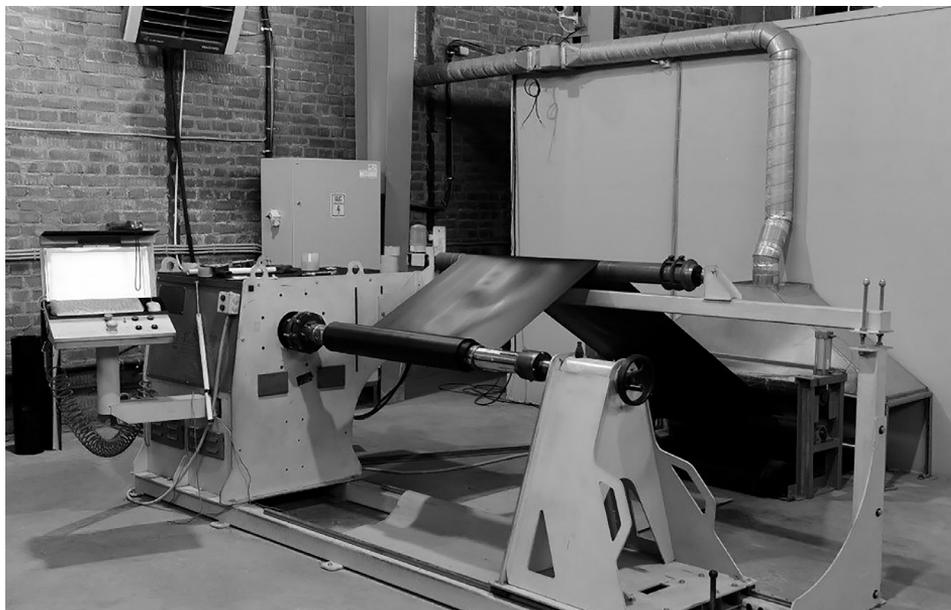
**Радиационно-сшитый вспененный полиэтилен (пенополиэтилен).** Такой вид материала производится вспениванием углеводородами. В результате получается упругое эластичное полотно, имеющее закрытопористую структуру ячеек. Выпускается в рулонах, листах, в виде скорлуп и жгутов. Материал получил широкое применение в разных отраслях промышленности, особенно в строительстве, благодаря высоким тепло-звукоизоляционным качествам, прочностным характеристикам, простоте монтажа и относительно невысокой стоимости.

Радиационная сшивка заключается в облучении полимеров пучком электронов. В результате облучения образуются межмолекулярные связи. Это приводит фактически к созданию новых материалов. Облучение осуществляется ускорителями электронов с энергией 0.3–5 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт.

Радиационный метод сшивки применяется в основном для модификации рулонных материалов на основе полиэтилена, поливинилхлорида, полиуретанов, полуфабрикатов для вспененных материалов, некоторых марок фторопласта.

Модификация полиэтилена и других материалов позволяет значительно повысить механическую прочность, термостойкость, устойчивость к химическим воздействиям и улучшить электроизоляционные свойства.

В нашей стране производство радиационно-сшитого пенополиэтилена осуществляет компания ООО «ПФК Техпрокомплект». Производство оснащено одним из самых новых электронных ускорителей марки ЭЛВ-4 производства ИЯФ им. Г. Будкера. С его помощью модифицируются различные рулонные материалы с шириной полотна до 1200 мм и толщиной до 3 мм. Установка для производства пенополиэтилена представлена на рис. 2.17. Она отличается



**Рис. 2.17.** Установка для производства пенополиэтилена

высокой производительностью и способна обеспечить равномерную радиационную сшивку полиэтилена и других полимерных рулонных материалов практически в неограниченных объемах.

Радиационная модификация химических волокон используется для получения волокнистого катионита, который предназначен для очистки воздуха от газообразных и аэрозольных примесей в общих вентиляционных системах, средствах индивидуальной защиты органов дыхания, системах очистки воды бытового и технического назначения от катионов тяжелых металлов.

**Производство модифицированных пористых материалов.** Широко распространен радиационный метод модифицирования пористых материалов: древесины, бетона, асбоцемента и др.

Суть данного способа заключается в том, что материал пропитывается химическими соединениями (мономерами или олигомерами), которые полимеризуются под действием ионизирующего излучения (обычно  $\gamma$ -излучения). Так, например, изделия из древесины увеличивают механическую прочность и стойкость к гниению при облучении в дозах 10–50 кГр. Бетонополимерные материалы, полученные радиационным методом, имеют существенно более высокую прочность, чем исходные бетоны; для них характерна повышенная устойчивость к внешним воздействиям. Модифицирование полимерами улучшает характеристики гипса, картона, бумаги и т.д. Этот метод используется для полимеризации оптики, например контактных линз.

**Производство термостойких самослипающихся электроизоляционных материалов.** Методом радиационной вулканизации резины производится электроизоляционная термостойкая самослипающаяся резиновая лента. Она изготавливается на основе стеклоткани и кремнийорганической резины методом радиационной вулканизации. При этом образуется монолитная очень прочная оболочка из силиконовой резины, обеспечивающая герметичную защиту соединения от воздействия атмосферы и солнца. На практике такие ленты типа ЛЭТСАР (ТУ 38-103171-73) производятся двух марок и двух сечений, которые различаются цветом и термостойкостью.

Лента обладает свойством аутогезии (отсутствием расслаивания) при намотке вполнахлеста уже через 48 ч. Она обладает стойкостью к воздействию ряда масел, бензина, химических реагентов, ультрафиолетовых лучей.

Лента применяется для изоляции гибких шунтов и выводов электрических машин постоянного и переменного тока, индукционных электропечей, высоковольтных трансформаторов, склейки, ориентирования, транспортировки и разработки полупроводниковых элементов, изоляции электрических кабелей, жгутов, шин и токопроводов.

### *2.5.2. Радиационное модифицирование материалов*

**Модификация изоляции кабелей.** Радиационная модификация применяется для улучшения качества изоляции проводов и термоусадочной оплетки, для защиты проводов и кабелей, с целью повышения их теплоустойчивости.

Такая технология с использованием сшивки полимеров пучком электронов широко применяется в промышленности, в том числе и у нас в стране. Первоначально она применялась для увеличения максимальной температуры, при которой могут эксплуатироваться кабели. Кроме того, оказалось, что облучение кабеля уменьшает их деформацию при нагреве, химическом, радиационном воздействии. Особенно важным оказался выпуск кабелей, обработанных пучком электронов, для атомных и тепловых электростанций, для кораблей, самолетов и ракет, нефтедобывающей промышленности, спецтехники. Использование таких кабелей существенно повысило надежность при работе в сложных и аварийных условиях, при высоких напряжениях.

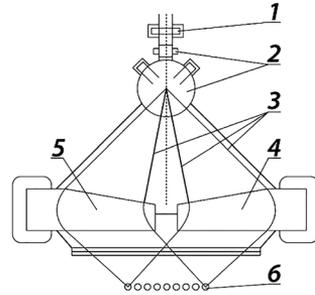
Облучение кабелей и проводов осуществляется на ускорителях электронов с энергиями 0,3–5 МэВ и мощностью до 100 кВт. Доза, необходимая для сшивания полиэтилена, составляет 200–400 кГр. Введение в полиэтилен сенсибилизаторов, повышающих поглощение энергии полиэтиленом, позволяет заметно снизить дозу облучения до 50–150 кГр.

Для обеспечения азимутальной однородности дозы облучения кабеля облучение в созданных установках, как правило, осуществляется с четырех сторон

(рис. 2.18). Кроме того, жесткие требования предъявляются к стабильности энергии и тока пучка электронов. В высокоавтоматизированных комплексах обеспечивается высокая скорость перемещения кабеля.

В нашей стране примером этого является предприятие Подольский кабельный завод. Для радиационной обработки проводов на нем используются два мощных промышленных ускорителя электронов — ЭЛВ-4 и ЭЛВ-8. Их энергия изменяется в пределах от 0.8 до 2.5 МэВ, ток пучка — до 50 мА, мощность до 100 кВт. В 2002 г. на предприятии была произведена замена ускорителей с ручным управлением на ускорители с компьютерной автоматизированной системой управления.

Они постоянно модернизируются (аналоговый сигнал заменен на цифровой, источники питания заменены на транзисторные). Поэтому они и не уступают образцам зарубежных аналогов ускорительной техники. На ускорителях осуществляется четырехсторонняя система облучения, разработанная в 1998 г. в ИЯФ им. Г. Будкера. Это позволило одновременно с уменьшением азимутальной неоднородности уменьшить энергию электронов и использовать технологию облучения для кабелей большего диаметра. Неравномерность радиальной сшивки по азимуту в этой системе составляет 3–5%.



**Рис. 2.18.** Установка четырехстороннего облучения: 1 — магниты сканирования с переключающим магнитом; 2 — выпускное устройство; 3 — траектории электронов; 4, 5 — правый и левый поворотные магниты



**Рис. 2.19.** Универсальная система транспортировки (ПТС)

Траектории пучков, как видно из рис. 2.18, пересекаются под углом  $90^\circ$ . Кабель под пучком электронов размещается так, чтобы на каждом повороте магнита верхняя и нижняя поверхности менялись местами. Кабель проходит зону облучения несколько раз.

Универсальная система транспортировки (ПТС) была разработана в ИЯФ им. Г. Будкера в лаборатории № 12. Устройство системы показано на рис. 2.19. Система состоит из двух барабанов: один — приводной, а другой — ведомый. В 2006–2007 гг. на Подольском кабельном заводе впервые в России были запущены 6 высокоавтоматизированных комплексов для облучения изоляции кабельных изделий сечением от 0.12 до 120 мм<sup>2</sup>.

**Производство термоусаживающихся изделий.** Термоусадочная пленка изготавливается из полиэтиленового пластика. Полимерные молекулы пластика представляют собой длинные цепочки атомов углерода, подобно бусам на нити. Каждый атом углерода также соединен с двумя атомами водорода до насыщения. Короткое облучение электронами превращает тонкий пластик в прочную усадочную пленку. Для этого используются ускорители электронов низких энергий 70–300 кэВ.

Физически это выглядит так. Облученный пучком электронов пластик становится химически активным, поскольку электроны выбивают из цепочки атомы углерода, создавая валентные области в молекуле. Ненасыщенные связи углеродных атомов находят друг друга, и такие связи углерод — углерод очень прочны. Таким образом при облучении внутри вещества начинается процесс «вязания», и заканчивается это образованием структуры, в которой, словно в рыболовецкой сети, все связано друг с другом. В результате такого процесса образуется модифицированная термоусадочная пленка — процесс, часто называемый реакцией кросс-линкинга.

Пройдя полностью процесс кросс-линкинга, пластик становится эластичным при нагревании до температуры плавления, но он не растечется и не растает. После обработки электронами пластик становится прочнее и намного термоустойчивее. Теперь его можно нагреть и растянуть в тончайшую пленку без угрозы разрыва. При охлаждении до комнатной температуры пластик сохранит свое растянутое состояние. Такая пленка не рвется и не трескается. Увеличивается ее теплостойкость и морозостойкость, уменьшается текучесть, растворимость и влагопроницаемость.

Ускорители электронов, таким образом, позволяют связать молекулы пластика вместе и придать пленке механическую прочность.

Модификация термоусадочных пленок, в основном для пищевой промышленности, составляет значительную долю спектра использования электронных пучков. Такие пленки продлевают срок годности мясных и молочных продуктов и пользуются большой популярностью. Так, например, крупнейший производитель такой пленки в США имеет 125 промышленных ускорителей

электронов для целей производства. Пленки также широко используются в качестве наполнителя в элементах автомобильного интерьера.

Одним из уникальных свойств полимерных пленок является наличие так называемого эффекта памяти, приобретаемого материалом в результате радиационной обработки пучком ускоренных электронов. Эффект памяти заключается в том, что геометрические размеры радиационно-обработанного изделия (например, пленки) находятся в определенном равновесном состоянии. При нагревании и механическом воздействии они могут быть увеличены (растянуты) в 1.5–2.5 раза и после охлаждения до комнатной температуры зафиксированы на неограниченно длительное время. В нужный момент при повторном нагреве до температуры плавления изделие возвращается к исходным размерам, зафиксированным в момент радиационной обработки.

**Радиационная обработка компонентов шин.** Важная сфера применения ускорителей — изготовление и модифицирование компонентов автомобильных шин. Электронно-лучевая обработка придает им износостойчивость и термостойкость. При этом одна электронно-лучевая установка мощностью около 10 кВт позволяет обрабатывать компоненты для производства до 1 млн шин в год. В России таких установок не более десятка, тогда как в Северной Америке — свыше 35, в Японии — 29.

В этих странах и в Европе радиационной обработке подвергаются более 90% производимых шин. Потенциально в нашей стране для радиационной модификации компонентов шин необходимо не менее 15–20 установок.

На радиационной установке ионизирующим излучением обрабатываются элементы шин: резиновая лента протектора, обрешиненный корд, боковой формованный профиль шины. Для обработки шин используют ускорители электронов с энергией 0.5–3 МэВ и мощностью пучка ~10 кВт. Необходимая поглощенная доза при облучении составляет 5–20 кГр. Отдельные компоненты облучаются перед сборкой и вулканизацией шины. При такой обработке улучшаются характеристики протектора — износостойкость, увеличение сцепления с дорожным покрытием разного типа. Также снижается усталость резинокордных деталей шин, например каркаса.

Смысл процесса радиационной обработки резины заключается в следующем: в процессе вулканизации под действием радиационного излучения сырая резиновая смесь преобразуется в резину или вулканизат. В процессе вулканизации происходит сшивание макромолекул каучука с образованием пространственной структуры, отличающей резину от сырого каучука, что коренным образом изменяет свойства материала. Для получения кожеподобной резины, по комплексу свойств не уступающей резине, полученной обычной серной вулканизацией, доза облучения должна составлять 50–60 Мрад.

### 2.5.3. Радиационная деструкция

Это процесс, протекающий под действием на полимер ионизирующих излучений от естественных радиоактивных источников ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -лучей) или пучков частиц из ускорителей. Энергия этих частиц значительно превышает энергию химических связей, которая в полимерах составляет 2.5–4 эВ. Под действием ионизирующего излучения разрываются межмолекулярные и межатомные связи. Частицы высоких энергий, сталкиваясь с молекулой, выбивают электроны из глубоких оболочек, а сама молекула распадается на катион и радикал. Макромолекулы полимера под действием излучения распадаются в результате разрыва связей цепи на обломки в виде радикалов, ионов, ион-радикалов. Эти обломки после рекомбинации и нейтрализации превращаются в низкомолекулярные продукты. Для некоторых полимеров результатом радиоллиза является сшивка.

Наиболее важными применениями технологий деструкции являются получение корма и кормовых добавок из целлюлозосодержащих отходов, регулирование молекулярной массы полимеров, деструкция тефлона и резины. Так, опилки, стружки, солома, мелкая щепа содержат большое количество полисахаридов и используются для создания кормов животных. Облучение таких отходов снижает содержание клетчатки и образует мономерные и олигомерные углеводы. Солома пшеницы после  $\gamma$ -облучения до дозы 1 МГр и кислотного гидролиза содержит в сухом остатке ~37% углеводов. Такие отходы облучаются дозой 200–600 кГр и могут заменить до 10% обычного корма для животных.

В качестве смазочного материала после радиационной деструкции применяется тефлон, отходы которого после превращения его в порошок или низкомолекулярные продукты облучаются в дозе до 1500 кГр. Как правило, изделия из резины после сравнительно непродолжительной эксплуатации выходят из строя. Однако многие вещества, входящие в их состав, остаются почти без изменений. После соответствующей регенерации их можно использовать повторно. Одним из методов такой регенерации является радиационная обработка, приводящая к деструкции полимера. Процесс состоит в измельчении отработанной вулканизированной резины, а затем облучении ее  $\gamma$ -излучением или электронным пучком с энергией ~1 МэВ. Оптимальная доза составляет 50–100 кГр. Полученный продукт в объеме 10–15% может быть добавлен к различным резиновым смесям.

### 2.5.4. Изменение цвета изделий из драгоценных и полудрагоценных камней

С радиационными технологиями успешно работают ювелиры. Свойство ионизирующего излучения образовывать центры окраски в твердых

телах применяется для изменения цвета некоторых стеклянных изделий, драгоценных и полудрагоценных камней (например топаза, агата, нефрита, турмалина, циркона, жадеита, кварца, берилла, скаполита, алмаза, жемчуга и др.). Таким же образом можно окрашивать и обычное стекло. Облучение используется для измельчения алмазного сырья при производстве режущих и шлифующих инструментов.

Рассмотрим в качестве примера получение голубых топазов. Природные топазы в основном бесцветные. Большинство цветов топазов связано с возникновением в камне цветочных центров. Исключения составляют розово-фиолетовый и розовый тона, причиной которых является наличие в камне примесей хрома. Почти все бесцветные топазы становятся коричневыми уже при облучении достаточно низкой дозой (5–10 Мрад). Коричневый компонент возникает под действием малых доз излучения и в цветных топазах. Как негативный эффект это проявилось в 2001 г. в США при облучении почтовой корреспонденции с целью уничтожения возможных спор сибирской язвы. Содержавшиеся в посылках топазы после облучения теряли свою ювелирную ценность.

С увеличением дозы излучения коричневый оттенок топазов сначала становится более насыщенным, затем при средних дозах (500–1000 Мрад) камни приобретают зеленовато-коричневый цвет, а на более высоких дозах (1000–5000 Мрад) — коричнево-голубой цвет. В конечном счете при очень высоких дозах (5000–20 000 Мрад) цвет топазов становится синим.

Причиной появления коричневого цвета являются два различных типа цветочных центров. Первый тип является нестабильным. С ним связан эффект исчезновения коричневого оттенка под действием света или при нагревании камня до температуры около 200 °С.

Для облучения топазов используется ионизирующее излучение, получаемое на реакторах, ускорителях электронов и в источниках  $^{60}\text{Co}$ . Преимущество пучков электронов по сравнению с  $\gamma$ -излучением заключается в возможности подведения к облучаемым объектам более высоких мощностей дозы, что позволяет существенно снизить время, необходимое для приобретения камнем нужной окраски. Для придания топазам новой окраски могут использоваться ускорители электронов, на которых получают пучки электронов с энергией от 10 до 20 МэВ. Обычно мощность пучка в таких ускорителях составляет 10–60 кВт. Это наиболее важная характеристика источника ионизирующего излучения при облучении топазов. Так, ускоритель мощностью 10 кВт обладает способностью производства от 15 до 45 тыс. карат топазов в сутки, а при мощности пучка 60 кВт производительность установки достигает от 100 тыс. до 300 тыс. карат в сутки.

От энергии электронов зависит глубина проникновения электронов в среду. Чем выше энергия, тем больше толщина слоя камней, который можно облучать.

Если электроны не проходят через камни, они останавливаются в них, и из-за низкой электрической проводимости топаза в камне будут накапливаться электрические заряды. Это может привести к возникновению электрических разрядов. Слабые разряды внутри камня приводят к появлению тонких линий, а более крупные — небольших белых точек. В большинстве случаев такие камни далее не используются.

Чтобы избежать таких явлений, выбирается энергия электронов, при которой они пройдут сквозь толщину камня. Для небольших камней диаметром порядка 0.5 см используются пучки электронов с энергией 10 МэВ, а для более крупных камней используются электрические пучки с энергией до 20 МэВ. При высоких энергиях возможно возникновение наведенной радиоактивности в топазе в зависимости от количества и химического состава примесей. В этой связи необходим период от нескольких дней до нескольких недель для снижения уровня радиоактивности до приемлемого.



В качестве примера приведем небесно-голубой топаз (рис. 2.20), который получается при облучении бесцветных топазов  $\gamma$ -излучением от источника  $\text{Co}^{60}$  или пучками электронов с энергией 10 МэВ.

Рис. 2.20. Небесно-голубой топаз

Другой пример — облагораживание алмазов. Россия является одной из ведущих алмазодобывающих стран. Однако большая их часть непригодна для ювелирных целей. Поэтому необходимо развитие исследований и разработок методик и технологий для облагораживания алмазов<sup>80</sup>. В настоящее время их облучают на линейных ускорителях и циклотронах. Для этих целей применяют пучки фотонов, нейтронов, электронов, протонов,  $\alpha$ -частиц и дейтронов. Поскольку под действием пучков нейтронов и фотонов облучение происходит по всему объему кристалла, то и окраска камней оказывается более равномерной. Поэтому использование этих излучений оказывается более целесообразным. При облучении частицы сталкиваются с атомами углерода, выбивая их и образуя вакансии.

При облучении нейтронами получают бриллианты зеленоватой окраски, а при облучении протонами алмазы коричневого или желтоватого оттенков приобретают зеленый цвет. Использование отжига при температуре 1900–2300 К приводит

<sup>80</sup> Попытки изменения окраски алмазов начались еще в Индии и Греции во II тысячелетии до н.э., где стали применять покрытия для усиления цвета. В середине II тысячелетия н.э. стали использовать для устранения дефектов поверхности алмаза мастики, масла, резину, ламповую сажу. А в XVIII в. использовали достижение химии — анилиновый краситель.

к изменению оттенков алмаза от желто-зеленого до розового. Для изменения оттенков алмаза с середины 1980-х гг. применяют лазерное излучение.

### 2.5.5. Получение нанопорошков

Ускорители электронов типа ЭЛВ<sup>81</sup> с энергией 0.2–2.5 МэВ, с током пучка до 200 мА и максимальной мощностью до 160 кВт используются для получения нанопорошков. Нанопорошки получают путем облучения природных или искусственно созданных материалов в атмосфере различных газов при атмосферном давлении. При их облучении пучком электронов происходит испарение вещества. Затем высокотемпературный пар охлаждается и находящиеся в газе наночастицы улавливаются в виде порошка. Размеры наночастиц составляют от 100 до 500 нм. Спрессованные нанопорошки проявляют необычные свойства и могут быть использованы в электронике, катализе, керамике, существует и много других применений.

Возможно развитие пучковых технологий для имплантации наночастиц, ускоренных электрическим полем. Данная технология позволяет обеспечить быстрое нанесение покрытий нанометровых толщин, включая создание многослойных систем на поверхности материала. Разработано множество методов получения наночастиц различных размеров из разных материалов, поэтому технически возможна предварительная подготовка порошка наночастиц с заданным распределением по размерам. Близкими к наночастицам объектами являются атомные и молекулярные кластеры, содержащие от нескольких единиц до нескольких тысяч атомов.

Наночастицы могут эффективно использоваться в качестве радиосенсибилизаторов. Ведутся исследовательские работы по использованию наночастиц золота для повышения эффективности лучевой терапии. Ионизационные потери энергии на наночастицах золота, введенных в опухоль, существенно выше, чем в биологических тканях. Это связано с тем, что сечение фотоэффекта пропорционально  $Z^3$  и по сравнению с биологической тканью составляет

$$R = \left( \frac{Z_{\text{Au}}}{Z_{\text{ткани}}} \right)^3 = \left( \frac{79}{7} \right)^3 = 1437. \quad (2.18)$$

Таким образом, даже небольшая их концентрация приводит к заметному изменению поглощенной дозы.

<sup>81</sup> Такие ускорители разрабатываются и производятся в институте ядерной физики СО РАН с 1971 г. Построено более 110 ускорителей, которые работают как в нашей стране, так и в других странах, например в Германии, Японии.

## 2.6. Ускорители в энергетике

Несмотря на весь прогресс в использовании для энергетики различного типа ядерного топлива, основной объем электроэнергии получается от обычного сжигания угля (40.7% генерирующих мощностей в мире), газа (21.2%), нефтепродуктов (5.5%), гидроэнергетики (16.2%) и атомной энергетики (16.4%).

Энергопотребление в мировом хозяйстве в ближайшие 12 лет существенно вырастет. По прогнозу министерства энергетики США, мировой рынок энергопотребления, согласно прогнозам, увеличится более чем на 20%, а чистое потребление электричества увеличится на 38% при увеличении потребления угля на 25%.

Ускорители частиц в этой связи играют важнейшую роль для решения энергетических проблем нашей цивилизации.

**Ускорители в атомной энергетике.** Ядерная энергия является одним из основных источников получения электроэнергии, к тому же не выбрасывающим парниковые газы. Она может служить источником электричества для автомобилей и производства водородного и синтетического топлива. Важнейшей задачей для рационализации производства ядерной энергии является сокращение радиотоксичности и времени жизни отходов.

Для того чтобы отработанное ядерное топливо реактора достигло уровня токсичности природного урана, должно пройти около 300 000 лет. Трансмутация (превращение) этих изотопов в изотопы с меньшим временем жизни сократит этот период всего до 500 лет.

Для решения этой задачи в последнее время расширяется использование мощных ускорителей протонов, пучки частиц из которых, попадая в металлическую мишень, формируют интенсивные вторичные пучки быстрых нейтронов. Эти нейтроны взаимодействуют с отработанным топливным веществом, содержащим долгоживущие изотопы, превращая их в изотопы с меньшим временем жизни. Структура топливной установки гарантирует, что ядерная реакция не произойдет без внешнего источника нейтронов, который производится на ускорителе заряженных частиц. Система, основанная на ускорительных технологиях, является субкритической и идеально подходит для переработки изотопов отработанного топлива и долгоживущих продуктов деления. Она безопасна, поскольку выключение ускорителя приводит к остановке энерговыделения в любой момент времени.

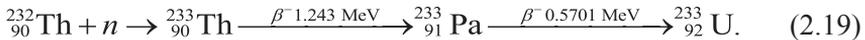
Ускорители в ближайшем будущем могут стать одним из основных элементов реакторов следующего поколения, которые, по выполненным разработкам, могут работать на неделящемся топливе, например таком, как торий. Третье перспективное направление использования ускорителей в энергетике — их применение в термоядерной энергетике.

Обычный ядерный реактор работает на основе управляемой цепной реакции деления изотопов, таких как плутоний-239 и уран-235. Цепная реакция основана на делении тяжелых ядер под действием нейтронов, в результате чего возникают новые нейтроны, которые снова вызывают деление.

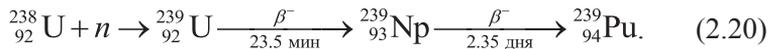
У физиков при изучении сечений поглощения нейтронов тяжелыми ядрами возникла идея облучать ядра  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{232}_{91}\text{Th}$  нейтронами с энергией 10 МэВ. Однако нейтроны, возникающие в результате деления этих ядер, имеют энергию до 2 МэВ и менее (в среднем  $\sim 1.25$  МэВ). Этой энергии явно недостаточно, чтобы запустить самоподдерживающуюся реакцию на быстрых нейтронах в  $^{238}_{92}\text{U}$ . Для осуществления цепной реакции нужна или энергия больше, или чтобы больше нейтронов вылетало в результате каждого акта деления.

Альтернативный подход заключается в использовании внешнего источника нейтронов для работы реактора на неделящемся топливе, таком как  $^{232}_{90}\text{Th}$ , что не создает цепной самоподдерживающейся реакции.

Природный торий, запасы которого в земной коре в 3–4 раза больше запасов урана, является потенциально ценным топливом для субкритических реакторов, работающих на пучках быстрых нейтронов, которые получают в ядерных реакциях протонов, получаемых на ускорителях. Тепловая мощность, выделяемая в результате субкритической реакции, обычно в 100 раз превышает мощность ускоренного пучка, что дает возможность создания эффективного способа получения значительной энергии. В субкритических ториевых реакторах нейтроны, которые появляются в результате попадания в мишень пучка протонов, приводят к реакциям



Также в реакторах на быстрых нейтронах может быть использован  $^{238}_{92}\text{U}$  или смесь тория и урана:



Такие реакции распада могут успешно служить для выработки энергии. Простое и быстрое отключение ускорителя прекращает реакции деления ядер.

Ториевый реактор, работающий с использованием ускорителей протонов, имеет преимущества: использование тория вместо урана уменьшает количество выработанных продуктов распада — актиноидов. Этот цикл производит вдвое меньше долгоживущих радиоактивных отходов на единицу энергии. Кроме того, вырабатывается гораздо меньше плутония, чем в обычном реакторе. В результате ториевого цикла вырабатывается высокорadioактивный изотоп  $^{232}_{92}\text{U}$ , что обеспечивает высокий радиационный барьер, препятствующий кражам и распространению отработанного топлива. При нынешнем уровне

потребления энергии доступно достаточное количество тория для поддержания энергоблоков более чем десять веков.

Трансмутация, основанная на ускорительных технологиях, значительно уменьшит влияние минорных актиноидов на долгосрочную радиотоксичность, упрощая конструкции хранения и использования богатого энергией компонента отработанного ядерного топлива и снижая риск распространения.

**Термоядерный синтез** является потенциальным источником практически безотходной и безопасной энергии. В морской воде содержится 0.02% дейтерия. Таким образом, его запасы практически неисчерпаемы. В мире используются два подхода к осуществлению реакции термоядерного синтеза: системы с низким давлением и большим временем удержания, работающие на удерживании магнитным полем (типа токамак), и системы с очень высокой плотностью, маленьким временем удержания, работающие на сжатии элемента топлива. Ускорительные технологии, использующие пучки ионов, играют ключевую роль в обоих случаях, либо в качестве поддерживающей технологии при синтезе плазмы, либо в качестве основного элемента при слиянии легчайших ядер.

В реакторах с магнитным удержанием плазмы, таких как ITER, строящийся во Франции международным консорциумом, токамак в России, ионные пучки участвуют в нагреве плазмы. Требования к таким пучкам достаточно жесткие: ток должен быть десятки ампер для отрицательно заряженных ионов с кинетической энергией около 1 МэВ, которые должны быть нейтрализованы и внедрены в плазму.

**Радиационно-термический крекинг нефти.** В нефтяной промышленности растет тенденция к увеличению доли переработки тяжелого углеводородного сырья с неблагоприятными факторами — высокой вязкостью и температурой затвердевания, наличием различных примесей. Традиционные методы термокаталитического процесса сложны и громоздки. Радиационно-термический крекинг нефти позволяет сократить на 60–65% затраты на производство 1 кг моторных топлив и в 50–100 раз уменьшить затраты на строительство необходимых для этих целей нефтеперегонных заводов. Основные научные исследования в этой области выполнены в СССР в 1970–1980-е гг. в Татарстане и Казахстане. В настоящее время эти результаты используются компанией Retrobeam (США) совместно с учеными из Казахстана. С использованием этих технологий строится завод с производительностью 1000 баррелей в сутки. В России есть научные школы в области радиационно-термического крекинга нефти и битумов.

В НИИЯФ МГУ совместно с ФГУП «НПП Торий» разработан ускоритель электронов, который может эффективно работать в этой области. Его параметры: энергия 5–10 МэВ, мощность пучка 200–5000 кВт, КПД не менее 50%, диапазон частоты клистронов 1 ГГц.

**Радиационная конверсия газообразных углеводородов.** Электронно-лучевая обработка может быть использована для безотходной конверсии природного и попутного газа в водород (жидкие разветвленные алканы). Это позволит устранить непродуктивное сжигание газа на удаленных нефтегазовых месторождениях. Реализация метода радиационной конверсии позволяет получать высококачественные компоненты детонационно-стойкого моторного топлива и водород. Для этих целей необходимы ускорители электронов с энергией излучения 200–700 кэВ и мощностью пучка 400–700 кВт.

В НИИЯФ МГУ разработаны ускорители с энергией пучка 500 кэВ и мощностью одного модуля 100 кВт. Размер установки менее 0.5 м<sup>3</sup>, масса менее 150 кг.

**Производство биотоплива.** Применение электронных пучков предлагает подход к использованию пищевых остатков, особенно зерновых, для производства этанола в целях снижения потребления бензина. С помощью электронных пучков можно перерабатывать крахмал и целлюлозу в возобновляемое сырье для использования в брожении. В отличие от обычных способов химического выделения такого сырья, вызывающего появление токсинов, предварительная обработка целлюлозы и крахмала электронными пучками делает возможным ферментное превращение отходовных веществ в спирт. Только в США в год потребление топлива на основе нефтепродуктов для транспорта составило более 522 млрд л. Замена 10% этого количества топливом на основе этилового спирта требует, по оценкам американских экспертов, использования порядка 700 ускорителей мощностью 500 кВт. Такой подход — вполне реальная перспектива в будущем.

## 2.7. Получение радиоактивных изотопов<sup>82</sup>

Радиоактивные изотопы используются во всех отраслях мирового хозяйства, от фундаментальной науки до промышленности, сельского хозяйства и медицины. Они стали незаменимыми компонентами в научных исследованиях и промышленности, имея сотни применений в медицине, биологии, физике, химии, сельском хозяйстве, национальной безопасности, материаловедении и т. д.

Широкий диапазон периодов полураспада радиоактивных изотопов и их различные типы излучения позволяют использовать их для разного типа целей. Изотопы, излучающие рентгеновские лучи,  $\gamma$ -лучи, электроны и позитроны,  $\alpha$ -частицы, протоны и нейтроны, могут служить в качестве диагностических

<sup>82</sup> К вопросу о производстве изотопов мы вернемся в разделе «Ядерная медицина».

зондов совместно с неинвазивным оборудованием, позволяющих видеть картину распределения излучения и, следовательно, строение биологических структур, движение жидкости или повреждение области (например, нарушение кровотока). Источники  $\beta$ -излучения (электронов) и  $\alpha$ -излучения (ядер гелия) выделяют большую часть энергии вблизи излучающего ядра и служат терапевтическими средствами по уничтожению раковых опухолей.

Возможность прикрепления радионуклида к фармацевтическому агенту для транспорта изотопа в необходимую область является ключом к эффективности применения изотопа.

В практическом применении, в частности в промышленности, радиоактивные изотопы играют большое значение. Их получают в реакторах и на ускорителях.

В мире для производства изотопов используются 1500 ускорителей (в основном высоковольтных и циклотронов), причем их число неуклонно растет. Широкое практическое применение нашли такие изотопы, как  $^{123}\text{I}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ,  $^{52}\text{Fe}$ ,  $^{97\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{179}\text{Ta}$  и другие.

В 1998 г. для производства изотопов в мире использовалось 200 циклотронов, в 2007 г. — 350, в 2016 г. — около 700, т. е. каждые 9 лет их число удваивается. Циклотроны в зависимости от их максимальной энергии могут производить разное число изотопов. Поэтому их условно делят на четыре уровня в зависимости от энергии: до 10, 20, 45 и 70 МэВ. В первом случае производится четыре изотопа (они используются для ПЭТ-диагностики), во втором случае — 11 изотопов, в третьем — 19, в четвертом — до 50. К 2010 г. 232 исследовательских реактора в 56 странах-членах МАГАТЭ использовались для производства изотопов. Так, например, в США действует более 250 циклотронов в ПЭТ-центрах. На ускорителях с энергией 30–40 МэВ производят долгоживущие изотопы, такие как  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{103}\text{Pd}$ , а также ряд других изотопов для исследовательских задач.

В мире более чем 10 000 клиник проводят около 30 млн процедур в год с использованием радиоактивных изотопов.

Среди ускорителей для производства изотопов главную роль играют сильноточные циклотроны (в основном изохронные циклотроны). Реже используют высоковольтные ускорители. В последние годы развиваются технологии, позволяющие использовать для получения изотопов сильноточные линейные ускорители электронов. На циклотронах ускоряют протоны (как правило, до энергий 30 МэВ), дейтроны — до 20 МэВ, ядра  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  — до 45 МэВ. Для создания условий высокого выхода изотопа при облучении мишени необходимы высокие токи пучка, которые достигают сотен микроампер при использовании внутренней мишени ускорителя и до 100 мкА — для внешней. Использование внутренних мишеней ускорителей создает проблему выделения в мишени большого количества тепла, а внешних — значительно уменьшает ток пучка. Однако в этом случае число веществ, которые могут

использоваться в качестве мишени, значительно расширяется. Помимо получения радиоактивных изотопов отдельной проблемой радиационной химии является выделение из мишени необходимого изотопа и его внедрение в органические соединения.

Производительность радионуклидов на реакторе выше, но ускорители обладают своими преимуществами. Во-первых, ускорители можно установить в любом учреждении, что позволяет использовать короткоживущие изотопы; во-вторых, на ускорителях получают нейтрон-дефицитные ядра (у которых число нейтронов меньше числа протонов), распадающиеся с испусканием позитронов, которые необходимы, например, для диагностики и ПЭТ-томографии; в-третьих, позволяют выбирать для производства радиоизотопа соответствующую реакцию и легко варьировать ее выход; в-четвертых, можно выбрать для производства изотопов ядерные реакции, в которых минимально количество других сопутствующих изотопов.

В последние годы на базе ускорителей развиваются технологии получения наночастиц, например, для радиофармпрепаратов.

На ускорителях получают десятки изотопов, применяющиеся в промышленности, сельском хозяйстве, гидрологии, экологии и медицине.

Применение ускорителей высоких энергий для производства изотопов нецелесообразно из-за малых сечений и токов пучка. В последние годы расширяется использование фотоядерных реакций, возникающих при взаимодействии тормозных фотонов средних энергий для производства изотопов. Во многих случаях использование ускорителей электронов для производства изотопов оказывается целесообразным. Несмотря на меньший выход изотопов, зачастую ускорительные технологии позволяют получить более чистый продукт. К тому же ускорители электронов имеют небольшие размеры и могут быть установлены непосредственно в клинике. А обслуживание ускорителей электронов существенно дешевле, чем реакторов.

# Глава 3

## Ускорители в радиоэкологии и сельском хозяйстве

Ускорители нашли широкое применение в радиационной экологии, радиационной биологии, медицинской стерилизации и сельском хозяйстве.

С помощью ионизирующего излучения ускорителей и радиоактивных источников исследования ведутся в следующих направлениях:

- в микробиологии для изучения влияния радиации на клетки микроорганизмов, исследования зависимости выживаемости клеток от дозы облучения;
- при стерилизации различных биологических веществ, объектов и тканей от микроорганизмов;
- в сельском хозяйстве при выведении новых полезных видов растений и генетических методов борьбы с вредными насекомыми (например, в вопросе замедления функций клеток растений к прорастанию и микроорганизмов при приготовлении вакцин и сывороток);
- в медицине — эффективное уничтожение опухолевых клеток при лучевой терапии и других процедурах ядерной медицины;
- в радиоэкологии при исследовании влияния ионизирующего излучения на компоненты выбрасываемых и сточных вод и механизмы их разложения.

В радиобиологии для многих исследований не принципиален вид источника ионизирующего излучения. На первый план выходит величина и мощность дозы, получаемой биологическим объектом. Исследуется, наряду с физическими и химическим этапами поглощения энергии биологической тканью, роль биологического этапа действия ионизирующего излучения на биологические среды. Значительный интерес при этом последнее время представляет роль малых доз.

При выборе дозы и времени облучения изделий во время стерилизации и радиационной обработки продуктов питания учитывается тот факт, что из 3000 видов микроорганизмов при дозе 10–40 крад погибает 75–85% видов, а при дозе более 100 крад практически 100% микроорганизмов. Для надежности эту дозу увеличивают в 10–40 раз. Чтобы поглощенная доза была стабильной, создают специальную систему контроля дозы.

В медицинской стерилизации применяют инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское, а также  $\gamma$ -излучение из радиоактивных источников и ускорителей заряженных частиц. Используя ультрафиолетовое излучение, стерилизуют помещения, предметы обстановки комнат, процедурные, операционные, используемое оборудование и т. д. Гамма-излучение и заряженные частицы применяют для стерилизации медицинских изделий (бинты, шприцы, вата, имплантаты и т. д.).

В сельском хозяйстве ионизирующие излучения с каждым годом все шире используются для радиационной обработки большого количества видов продуктов (мясных, рыбных, овощей, фруктов, специй и т. д.). Кроме того, ионизирующие излучения показали свою эффективность как стимуляторы роста. Так, небольшие дозы стимулируют, например, большее вылупление цыплят из яиц в инкубаторах, улучшают всхожесть семян.

В радиационной экологии ускорители позволяют очищать выхлопные газы на промышленных предприятиях, очищать питьевую и сточную воду, канализационные стоки.

### 3.1. Радиационная биология

Действие ионизирующих излучений на биологические процессы в живых объектах проявляется в нарушениях нормальной жизнедеятельности биологического объекта, например клетки, вплоть до ее гибели либо сразу, либо в последующих поколениях.

В биологии больше используется  $\gamma$ -излучение, причем в значительной степени от радиоактивных источников. Во многих задачах проблема энергии излучения менее важна, чем активность источника. Более интенсивное  $\gamma$ -излучение, а также пучки заряженных частиц получают на ускорителях. Используемые на практике энергии составляют единицы МэВ. Реже используются частицы с энергией выше 10 МэВ. Это связано прежде всего с тем, что внешнее воздействие на живые организмы в результате катастроф, техногенных аварий, радиации космического излучения в большинстве случаев обладает энергией до 10 МэВ. Для этой цели применяются разные ускорители на низкие<sup>83</sup> и средние энергии (высоковольтного типа, циклотроны, линейные ускорители и др.).

Важное значение в радиобиологии представляет плотность ионизации — энергия, переданная веществу на единицу длины. К излучениям с высокой

<sup>83</sup> Исторически сложилось несоответствие величин низких, средних и высоких энергий для ускорителей, используемых в народном хозяйстве и науке, поэтому для разных глав мы будем уточнять значения этих энергий.

Редкоионизирующие и плотноионизирующие излучения

Критерий	Ионизирующие излучения	
	редкоионизирующие	плотноионизирующие
ЛПЭ, КэВ/мкм	менее 10	более 10
Название ИИ	все электромагнитные ИИ, $\beta$ -излучение	протоны, др. ядра отдачи, $\alpha$ -частицы, нейтроны

плотностью ионизации<sup>84</sup> (плотноионизирующие) относятся тяжелые частицы (протоны,  $\alpha$ -частицы, дейтроны, нейтроны и другие ионы), с низкой (редкоионизирующие) — электроны и  $\gamma$ -кванты.

Редкоионизирующие ионизирующие излучения (ИИ) обладают линейными потерями энергии (ЛПЭ) на единицу длины менее 10 кэВ/мкм, а плотноионизирующие — более 10 кэВ/мкм. Они представлены в табл. 3.1.

Ускорители в радиационной биологии применяются для изучения причин гибели клетки и приводящих к этому механизмов, для имитации последствий для живых организмов и растений ядерного взрыва и аварий на атомных станциях.

Широкое применение нашло вторичное излучение ускорителей, например синхротронное. С его помощью исследуются биополимеры, проводятся рентгенографические исследования биологических структур с высоким временным разрешением, например динамики мышцы в процессе сокращения. Это позволяет видеть состояние микрососудов сердечной мышцы и предупреждать развитие инфаркта. Синхротронное излучение применяется при анализе состояния и динамики белков, нуклеиновых кислот, вирусов, локальной структуры клетки, а также в исследованиях структуры биологических тканей в норме и патологии, анализе биологических объектов с целью экологического мониторинга и медицинской диагностики.

Аналогичные работы ведутся по использованию в биологических и медицинских исследованиях излучения лазеров на свободных электронах.

### 3.1.1. Физические механизмы действия ионизирующих излучений на биологические ткани

Биологическая ткань или живой организм с физической точки зрения представляют собой набор слабо связанных и несвязанных атомов, поскольку энергия ионизирующих частиц, как правило, во много раз превышает энер-

<sup>84</sup> Под плотностью ионизации понимают количество актов ионизации на единицу длины пути вдоль траектории пучка частиц.

гию межатомных и межмолекулярных связей. Когда энергия ионизирующих частиц становится сравнимой или меньше энергии связи электронов с ядром, взаимодействие происходит с атомом или молекулой как целым.

Биологическая ткань, например тело человека, содержит 35% атомов кислорода, 18% углерода, 45% водорода и 2% азота (суммарный вклад других химических элементов в состав человеческих тканей: Na, Mg, P, S, K, Ca, Cl, Fe — меньше процента и им во многих оценках и расчетах можно пренебречь). Однако масса перечисленных элементов составляет 61, 24, 10 и 3% соответственно. Менее 2% массы тела приходится на остальные химические элементы.

Поскольку вода составляет примерно 75% общей массы тела, то первичные процессы при воздействии ионизирующего излучения определяются поглощением энергии излучения водой, находящейся в клетках и межклеточном пространстве. В результате ионизации молекул воды образуются свободные радикалы H и OH.

Действие ионизирующего излучения на биологическую ткань можно условно разделить на действие на молекулярном уровне (в том числе на макромолекулы) и на клеточном уровне.

На молекулярном уровне ионизирующим излучением поражаются молекулы и атомы. Физически это означает разрыв межатомных и межмолекулярных связей и образование новых связей между молекулами и атомами, а также ионизацию атомов и молекул.

При взаимодействии ионизирующих частиц с молекулами чаще остальных процессов (примерно на порядок) происходит неупругое взаимодействие. Когда частица переводит простую молекулу в возбужденное состояние в результате неупругого взаимодействия, она с большей вероятностью, чем большие молекулы, может распасться на части. Кроме того, частица может осуществлять ионизацию составляющих молекулу атомов.

Из всех первичных событий, не приводящих к ионизации, примерно 45% составляют возбужденные состояния.

Поражение молекулы может носить прямой или косвенный характер<sup>85</sup>. В случае прямого механизма ионизирующая частица воздействует на молекулу непосредственно, разрывая связи между атомами, выбивая из них электроны.

Прямое действие радиации представляет собой сложную последовательность событий, происходящих от момента передачи энергии излучения молекуле или макромолекуле и до появления стойких структурных и функциональных изменений. Условно этот процесс может быть поделен на четыре стадии: физическую, физико-химическую, химическую и биологическую.

---

<sup>85</sup> Ионизирующие излучения делятся на прямо ионизирующие и косвенно ионизирующие. К первому типу относятся заряженные частицы: электроны, протоны, ионы. Ко второму типу ионизирующих излучений относятся нейтральные частицы: фотоны, нейтроны, которые могут высвобождать заряженные частицы, осуществляя ядерные реакции.

На первой, **физической, стадии** энергия излучения передается веществу благодаря возникновению возбужденных и ионизированных молекул, неравномерно распределенных в пространстве. Эти события происходят в течение  $10^{-16}$ – $10^{-14}$  с. Вероятность передачи энергии ионизирующей частицы отдельной молекуле не зависит от ее химической структуры, а определяется суммарной электронной плотностью, имеющей примерно равные значения для различных биологических молекул и воды.

На второй, **физико-химической, стадии** происходят различные реакции, приводящие к перераспределению поглощенной энергии между возбужденными молекулами. Эти реакции протекают за время порядка  $10^{-14}$ – $10^{-11}$  с.

В течение этой стадии возникает много вариантов дальнейших превращений. Поглощенная энергия может переходить в энергию колебаний (растяжение, изгиб линейных молекул). В сложных молекулах, находящихся в возбужденных состояниях, энергия электронов легко вследствие наличия вращательных и колебательных уровней переходит в колебательную, вращательную форму. При этом атомы в молекуле колеблются с дискретными частотами, а сами молекулы или их части вращаются; частота вращения вокруг каждой из трех осей координат также является квантованной.

Третья, **химическая, стадия** характеризуется биохимическими процессами и длится  $10^{-10}$ – $10^{-6}$  с.

На этой стадии происходит структурная перестройка молекул, сопровождающихся изменением их размеров, разрывами и сшивками в результате присоединения обломков молекул. Эта стадия доминирует в макромолекулах<sup>86</sup>.

Поражение макромолекул проявляется в образовании в них разрывов и сшивок. Это происходит в результате либо ионизации молекул или атомов, либо миграции поглощенной энергии по макромолекулам. На рис. 3.1 приведены примеры структурной перестройки макромолекул. Кроме того, происходит миграция энергии по биологической структуре. На эти процессы оказывают влияние внешние факторы: наличие кислорода, температура среды, наличие различных примесей.

В макромолекулах под действием ионизирующего излучения возникают следующие типы структурных повреждений: одно- и двухнитевые разрывы, межмолекулярные поперечные сшивки полинуклеотидных цепей, разветвление цепей макромолекул вследствие суммарного эффекта одиночных и двойных разрывов (за счет присоединения обломков молекулы, образовавшихся в результате двойного разрыва, к местам одиночных разрывов в цепи ДНК). Это происходит в результате косвенного механизма поражения молекул — миграции поглощенной энергии по макромолекулам (рис. 3.1).

<sup>86</sup> К макромолекулам относятся органические молекулы, состоящие из последовательности (цепи) простых молекул.

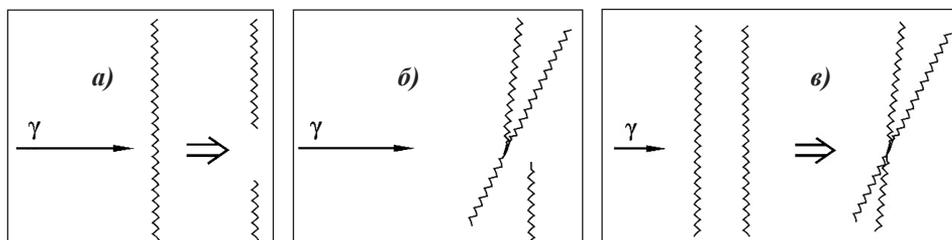


Рис. 3.1. Примеры структурной перестройки молекул

Четвертая, **биологическая, стадия** связана с воздействием ионизирующего излучения на клетку, на органы человека или другого живого организма, а также на весь организм в целом. Она может длиться от долей секунды до сотен лет.

**Клеточный уровень.** Воздействие ионизирующих излучений на клетку описывается числом актов ионизации, произошедших в различных структурах клетки. Гибель клеток различного типа будет происходить при их облучении в дозах от 1 до 11 Гр.

Для анализа воздействия ионизирующего излучения на клетку и ее структуры в биологии применяется принцип попадания в мишень<sup>87</sup>. Воздействие ионизирующих излучений на клетку описывается числом актов ионизации, произошедших в клетке, которых достаточно для ее гибели.

Если произошла одна ионизация, механизм называют одноударным, если две — двуударным, если более двух — многоударным. Некоторые клетки и одноклеточные организмы, например кишечная палочка, гибнут от одного акта ионизации внутри них. Большинство объектов являются двуударными или многоударными.

Одноударный процесс заключается в однократной передаче некоторого количества энергии чувствительному объему мишени, в результате чего клетка погибает. Двуударный объект поражается при наличии двух близких в пространстве событий, располагающихся в пределах критического объема ионизационных ударов.

Различие между одноударными и двуударными объектами заключается в том, что одноударные объекты чувствительны к редкоионизирующим излучениям, а двуударные — к плотноионизирующим излучениям. Внутри клетки действие ионизирующего излучения более эффективно поражает ядро клетки, чем ее цитоплазму. Их условно также делят на четыре стадии, описанные выше.

В течение первой стадии происходит передача энергии отдельным молекулам, расположенным вдоль треков частиц. Молекулы, поглотившие энергию

<sup>87</sup> «Теорию попадания» сформулировал в 1924 г. Дж. Кроутер. Попаданием считается акт ионизации в некотором облучаемом жизненно важном для клетки объеме.

излучения, как отмечалось выше, переходят в различные возбужденные состояния, часть которых заканчивается ионизацией.

На второй стадии действия излучения на клетку происходит внутримолекулярная миграция энергии и диффузия радикалов воды, а также различные межмолекулярные перестройки возбужденных и ионизированных клеточных структур. Например, при облучении протонами цепи ДНК на клетку приходится 500–900 односторонних и ~60 двойных разрывов.

На третьей стадии продукты взаимодействия излучения с молекулами быстро претерпевают вторичные превращения, приводящие к образованию биорадикалов, которые взаимодействуют друг с другом и с окружающими молекулами. Это приводит к возникновению стойких молекулярных изменений — разнообразных повреждений в структуре молекул, составляющих живую клетку.

С ростом линейных потерь энергии (ЛПЭ) излучения в 23 раза увеличивается эффективность лучевого поражения клеток и снижается их способность к восстановлению — вероятно, за счет появления трудно репарируемых<sup>88</sup> повреждений. Если скорость нанесения повреждений клетке соизмерима со скоростью и эффективностью работы восстановительных систем, то организм окажется в состоянии исправлять возникающие повреждения, не допуская их реализации.

На четвертой, биологической, стадии действия ионизирующего излучения возникают функциональные нарушения в клетке и формируется ее ответная реакция на облучение. Разные части клеток и их функции по-разному реагируют на облучение одинаковой дозой. Ядро клетки существенно чувствительней цитоплазмы. Для его гибели необходима в десятки раз меньшая доза.

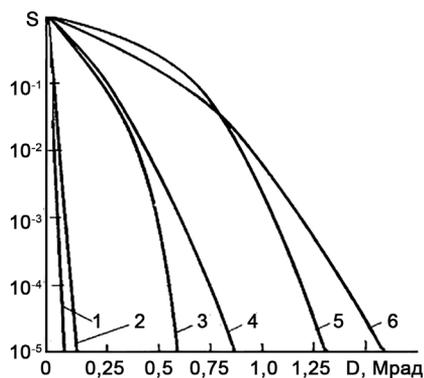
Первая видимая реакция клеток на облучение — задержка деления клеток в ожидаемый момент. Часть облученных клеток популяции, вступив в процесс деления (митоз), не в состоянии разделиться. Образуются гигантские клетки. В конечном итоге гигантские клетки погибают, вероятно, из-за нарушения механической прочности мембран и изменения оптимального для их питания соотношения поверхности клетки и ее объема.

В области малых доз (вплоть до нескольких сотен рад) выживаемость клеток резко падает с ростом дозы, а в области больших доз с увеличением дозы облучения их выживаемость уменьшается значительно медленнее.

Действие ионизирующего излучения на микроорганизмы (бактерии, грибы и т. д.), вирусы изучается в радиационной микробиологии. Его обычно изображают в виде кривых выживаемости — зависимости доли выживших клеток от поглощенной дозы в среднем каждым микроорганизмом. По ним видно (в начале кривой наблюдается плечо, см. рис. 3.2), что одного попадания частицы в простейший микроорганизм, например клетку, недостаточно. По сути,

<sup>88</sup> Другими словами, восстанавливаемых повреждений.

если достаточно одного попадания, то зависимость должна быть экспоненциальной. Примером одноударных клеток служит кишечная палочка. Большинство клеток гибнет в результате двух или более попаданий частиц ионизирующих излучений. В этом случае кривая выживаемости отличается от экспоненциальной зависимости. При высокой плотности ионизации выживаемость таких клеток становится выше, поскольку энергия излучения может передаваться уже погибшим клеткам. При низкой плотности ионизации большая часть одноударных клеток поражается потоком излучения.



**Рис. 3.2.** Кривая выживаемости клеток:  $S$  — выжившая доля исходной популяции бактерий: 1–2 — *Pseudomonas*, 3–4 — *Strep. faecium*, 5–6 — *Cl. Botulinum*

Исследуется влияние на выживаемость клеток других факторов, действующих одновременно с ионизирующим излучением. Например, присутствие кислорода усиливает поражающее действие ионизирующего излучения.

Химические элементы или соединения, ослабляющие действие радиации, получили название радиопротекторов. Они поглощают часть энергии возбуждения. Кроме радиопротекторов применяют и вещества, усиливающие действие радиации. Такие вещества получили название радиосенсибилизаторов. Примером являются наночастицы. Их введение, например, в опухоль усиливает действие радиации.

Разные живые организмы погибают при облучении разными дозами. Примеры полублетальных и летальных доз для некоторых организмов представлены в табл. 3.2 и 3.3. Некоторые микроорганизмы выживают при дозах 450 000–700 000 Р<sup>89</sup>, или 4.5–7.0 кГр.

**Таблица 3.2**

**Летальные дозы некоторых живых организмов и растений**

Виды живых организмов	Летальная доза, Гр	Виды живых организмов	Летальная доза, Гр
Человек (1 степень) (4 степень)	1–2 более 6	Караси	18
		Змеи	80–200
		Амебы	1000
Обезьяна	6	Дрожжи	300
Мыши	5.5–6.5	Семена капусты	640

<sup>89</sup> Отметим для разных единиц, что 1 кГр = 1000 Гр ~100 000 Р.

Полулетальные дозы на уровне 50% выживаемости видов

Вид	Доза, Гр	Вид	Доза, Гр
Человек	2.5–4	Осел	2–4
Обезьяна	2.5–6	Кролик	9–10
Крысы	7–9	Рыбы	8–20
Насекомые	10–100	Водоросли (хлорелла)	180
Инфузории	3000–7000	Вирусы	4500–7000
Овца	1.5–3	Хомяк	9–10
Собака	2.5–3	Мыши	6–15
Птицы	8–20	Змеи	80–200
Растения	10–1500	Амебы	1000
Кишечная палочка	50–100		

### 3.1.2. Особенности взаимодействия частиц с биологическими тканями

Среди ионизирующих излучений выделим те, которые используются для облучения биологических объектов. Это тяжелые заряженные частицы — протоны и ионы. Они, как отмечалось выше, относятся к плотноионизирующим излучениям, а пучки электронов и фотонов — к редкоионизирующим излучениям. Поглощенная доза в биологических тканях для разных видов ионизирующих излучений сильно зависит от линейных потерь энергии (ЛПЭ) частицами.

Проследим действие на ткани различных видов ионизирующих излучений, начиная с тяжелых заряженных частиц.

**Протоны.** Рассмотрим взаимодействие протонов с биологической тканью по мере их движения в ней, а следовательно, и уменьшение их энергии. В результате ионизации образуются вторичные электроны, большая часть которых имеет невысокую энергию (менее 100 эВ). Образование пар зарядов (электронов и ионов) происходит в узком слое вокруг трека частицы, причем плотность ионизации оказывается примерно постоянной на большей части пути протона в среде. Они останавливаются практически в той точке, где образовались.

Вторичные  $\delta$ -электроны, энергия которых превышает 100 эВ (иногда этот предел приравнивают к 1 кэВ), составляют ~25% всех образовавшихся вторичных частиц. Они проходят расстояние около 200 мкм. По мере того

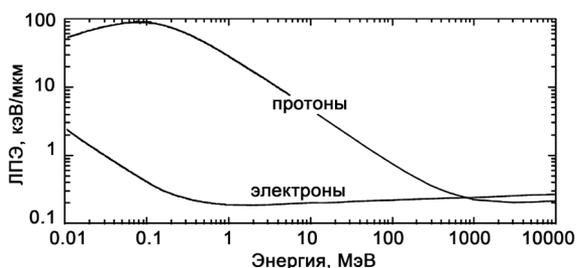
как протон теряет свою энергию, его скорость снижается и, следовательно, увеличивается сечение взаимодействия с атомными электронами и возрастает число образовавшихся ионов. При энергии протонов порядка 1 МэВ в среднем на каждый микрон пути образуется более 1.5 тыс. пар ионов, которые распределены вдоль трека частицы неравномерно. Плотность ионизации продолжает резко возрастать к концу трека. По мере торможения частицы плотность ионизации проходит через максимум, а затем резко падает (рис. 3.3).

**Ионы.** Если через живую ткань проходит частица, более тяжелая чем протон, например  $\alpha$ -частица, механизм взаимодействия с атомами и молекулами организма принципиально не отличается от описанного выше для протонов. Тем не менее между действием на ткани протонов и ионов имеются и различия, которые в первую очередь обусловлены плотностью линейных потерь энергии (ЛПЭ). Количество пар ионов, образующихся на единицу длины пути у ионов существенно выше. Так называемая «шуба» из вторичных электронов, возникающая вокруг трека, у ионов оказывается существенно плотней, чем у протонов.

Рассмотрим картину ионизации, возникающую в клетке в результате облучения суспензии клеток  $\alpha$ -частицами с энергией 2.5 МэВ. Можно подобрать дозу, при которой каждая клетка испытывает в среднем одно попадание. В случае  $\alpha$ -частиц с энергией 2.5 МэВ в результате одного попадания в клетке формируется короткий трек длиной 13 мкм с очень высокой плотностью ионизации — в среднем образуется 2.5 тыс. пар ионов на 1 мкм пути. Большая часть ионизации представляет собой скопления из одной-двух пар зарядов, практически непрерывно следующих друг за другом вдоль прямолинейного трека частицы; некоторая часть ионизаций производится высокоэнергетическими  $\delta$ -электронами, которые ответвляются от основного трека во всех направлениях.

В пределах объема макромолекулы, например размером  $10^{-3}$  мкм, происходит 1–3 ионизации. Этого достаточно для осуществления одного или двух нитевых разрывов. При более низких энергиях тяжелых заряженных частиц (10–100 кэВ) плотность ионизации оказывается выше в несколько раз (рис. 3.3), форма ее зависимости от энергии практически не отличается. В этом случае молекулы и макромолекулы будут поражаться еще эффективней.

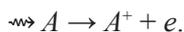
**Электроны.** Прохождение электронов через биологиче-



**Рис. 3.3.** Зависимость линейных потерь энергии электронами и протонами от их энергии

скую ткань сильно отличается от прохождения тяжелых заряженных частиц. Электроны обладают небольшой массой и поэтому сильно рассеиваются, увеличивая объем облучаемой ткани.

Свободный электрон проходит в тканях определенное расстояние, осуществляя вдоль своего трека акты ионизации:



Так происходит передача энергии излучения биологическим средам. Кроме того, часть энергии расходуется на возбуждение атомов:



Растратив запас кинетической энергии на ионизацию и возбуждение, свободный электрон замедляет движение до скорости, сравнимой со скоростью орбитальных электронов, а затем захватывается нейтральным атомом с образованием отрицательного иона:  $e + A \rightarrow A^-$ .

Медленные, в основном вторичные электроны с энергией до 1 кэВ создают очень короткие треки с высокой плотностью ионизации (вся энергия частицы передается веществу на 0.1–1 мкм пути). В этом случае происходит примерно 30 ионизаций на длине 0.1 мкм. В пределах макромолекулы размером 0.003 мкм возникнет примерно одна ионизация.

Электроны с большей энергией (0.5 МэВ) имеют величину потерь энергии ЛПЭ = 0.2 кэВ/мкм. Такие электроны образуют около 6 пар ионов на 1 мкм пути, т. е. вероятность возникновения ионизации в пределах белковой молекулы толщиной около 0.003 мкм весьма мала. Проникновение электронов с такой энергией происходит на глубину порядка 1600 мкм.

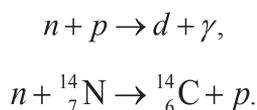
Фотоны при прохождении через биологическую среду формируют электронно-фотонные ливни, образуя поток вторичных электронов и фотонов. Вторичные электроны формируют поглощенную дозу от пучка фотонов, а вторичные фотоны увеличивают облучаемый объем облученной биологической ткани, который необходимо учитывать при планировании лучевой терапии.

Если же клетка поглотила фотон рентгеновского излучения с энергией 200 кэВ, то в пределах клетки рождается, как правило, один свободный электрон в результате фотоэффекта или комптоновского рассеяния. Если фотон образовал электрон в результате комптоновского взаимодействия, то его средняя энергия составит около 45 кэВ, а плотность ионизации — 8.5 пар ионов на 1 мкм пути. При такой низкой плотности ионизации в пределах мишени малого размера может возникнуть в лучшем случае одна ионизация. Учитывая, что толщина клеточной мембраны составляет около 0.01 мкм, а хромосомы

имеют размер порядка 0.1 мкм, на них приходится в пределах оболочки менее одной ионизации на шесть клеток и две хромосомы соответственно.

**Нейтроны.** Пучки нейтронов, вступая в ядерные реакции, также формируют потоки различных вторичных частиц, распределение которых по энергии и углу необходимо учитывать при расчете поглощенной дозы. Пучки нейтронов относятся к плотноионизирующим излучениям.

При облучении биологических тканей медленными нейтронами их сечение взаимодействия, особенно в области разрешенных резонансов, достаточно велико. Поэтому они взаимодействуют с ядрами атомов упруго или не упруго рассеиваясь либо вступая в ядерные реакции ( $n, \gamma$ ) или ( $n, p$ ). Примером таких реакций являются:



В них образуются фотоны с энергией 2.23 МэВ и протоны с энергией 0.6 МэВ соответственно. Образовавшиеся в ядерных реакциях под действием нейтронов вторичные протоны тормозятся практически сразу (при энергиях протонов 0.25–2.5 МэВ их пробег составляет 5–110 мкм).

Облучение нейтронами высоких энергий (10–15 МэВ), как и медленными нейтронами, приводит к возникновению ядер отдачи по всему объему поглощающей ткани.

Для рассмотренных выше типов ионизирующих излучений характерна относительная биологическая эффективность (ОБЭ) — величина, характеризующая способность различных видов ионизирующего излучения вызывать биологические эффекты при равной дозе. В табл. 3.4 приводятся коэффициенты качества (КК) для различных типов ионизирующих излучений, используемых в радиобиологии.

Таблица 3.4

Коэффициенты КК различных видов излучения

Виды излучений	Коэффициент качества излучения, $K$
Рентгеновское и $\gamma$ -излучение	1
Электроны	1
Протоны	10
$\alpha$ -Частицы	20
Медленные нейтроны (10–50 кэВ)	3
Быстрые нейтроны (> 50 кэВ)	10
Тяжелые ионы	20

## 3.2. Радиационная стерилизация в медицине

Обычная стерилизация<sup>90</sup> осуществляется при высокой температуре. Но в некоторых случаях такой метод неприменим, например в случае изменения свойств лекарственных препаратов при нагреве. Стерилизация ионизирующим излучением имеет целый ряд преимуществ: не требует высоких температур, ведется в обычном производственном режиме, обладает высокой надежностью. Метод радиационной стерилизации заключается в разной радиочувствительности микроорганизмов по отношению к действию ионизирующих излучений.

Радиационная стерилизация медицинских изделий в последние годы применяется все чаще во многих странах мира. В настоящее время таким способом стерилизуется более 50% медицинских изделий одноразового использования: шприцы, иглы, хирургические принадлежности, имплантируемые материалы и ткани, анестезиологические и акушерские наборы, оборудование для ингаляции, донорская кровь, перевязочный материал, маски, биндажи, пипетки и т. д.). Радиационная стерилизация, помимо медицинских изделий одноразового пользования, осуществляется для некоторых фармацевтических препаратов (мазей, капель, растворов, упаковочного материала, а также твердого фармацевтического сырья, лекарственных препаратов, суспензий, антибиотиков и гормонов, гидрогелей для лечения ран и ожогов). Ионизирующие излучения используют также для производства вакцин и стерилизации токсинов. Особенно перспективен метод лучевой стерилизации различных изделий одноразового пользования, изготовляемых из пластмасс, например систем службы крови и шприцев. Однократное употребление этих шприцев ликвидирует опасность заражения инфекционным гепатитом, что наблюдается при стерилизации шприцев обычным способом.

Этот метод все шире используется для стерилизации органов и тканей человека и животных, используемых в имплантационной хирургии, часто одновременно с неионизирующими методами.

В радиационной стерилизации применяют ускорители электронов и радиоактивные источники<sup>91</sup>  $\gamma$ -излучения, например  $^{60}\text{Co}$ . Их энергия обычно составляет 1–10 МэВ. Для стерилизации упаковок медицинских изделий применяют пучки с низкой энергией. Пучки электронов в последнее время применяют для радиационной стерилизации чаще, чем  $\gamma$ -излучение. Это

<sup>90</sup> Под радиационной стерилизацией понимают облучение медицинских изделий пучками ионизирующих излучений, а под радиационной обработкой продуктов питания, растительного сырья понимают их облучение пучками ионизирующих излучений (фотонов и электронов).

<sup>91</sup> Установки, использующие источник  $^{60}\text{Co}$ , получили название  $\gamma$ -установок.

связано, прежде всего, с большей мощностью и, следовательно, меньшим временем облучения. Поскольку интенсивность излучения на ускорителях выше, чем в радиоактивных источниках, стоимость стерилизации на них ниже. К тому же глубина проникновения  $\gamma$ -излучения от ускорителей выше, чем от кобальтовых  $\gamma$ -установок.

Во многих случаях радиационная стерилизация является наиболее эффективным методом. Например, для лекарственных препаратов, органов и биологических тканей для пересадки, искусственных имплантатов (сердечных клапанов, сосудов, пластиковых элементов костей) горячая стерилизация невозможна.

В лабораторных условиях активно исследуются биологические ткани, используемые для пересадки (трансплантации) с целью создания банков таких тканей и органов и условий их длительного хранения. Так, например, костные ткани, предварительно помещенные в камеру из сухого льда, облучаются пучком электронов с энергией 3 МэВ, получая дозу примерно 1 Мрад. Облучение к тому же подавляет отторжение имплантатов, возникающее из-за биологической несовместимости различных организмов.

К фармакологическим продуктам и биомедицинским препаратам, которые вводятся внутрь человеческого организма, предъявляются очень высокие требования к стерильности относительно микроорганизмов и вирусов. Поэтому осуществляется радиационная стерилизация при дозе величиной до 10 Мрад.

Развитию методов радиационной стерилизации препятствует предубежденность об опасном влиянии радиации на облучаемые вещества.

Во многих странах принята стерилизующая доза 25 кГр. В ряде стран (США, Канада) не существует фиксированной дозы. Она определяется исходным количеством микроорганизмов в стерилизуемом продукте, их природой и чувствительностью к действию излучения и может колебаться от 10 до ~30 кГр. Дозы сравнительно высоки, и, следовательно, возникает проблема радиационной стойкости препаратов и материалов. Многие полимеры, используемые в производстве медицинских изделий, обладают достаточно высокой радиационной стабильностью. Самым обычным и дешевым методом стерилизации является обработка паром. Наиболее дорогим методом является стерилизация этиленоксидом<sup>92</sup>. Обсуждаемый радиационный метод занимает среднее положение, однако он может конкурировать с паровым методом. Для многих медицинских изделий одноразового пользования радиационный метод является предпочтительным.

---

<sup>92</sup> Окись этилена используют для стерилизации медицинских инструментов, аппаратуры, пластмасс, перевязочных материалов. Обработку осуществляют в специальных аппаратах с камерами, где поочередно создают вакуум и давление, после чего производят 2–4-кратную обработку стерильным воздухом. Для стерилизации растворов достаточно 400–500 мг окиси этилена на 1 л при 20 °С; длительность экспозиции составляет 6 ч.

**Изделия одноразового применения.** К ним относятся изделия, которые используются однократно, чтобы исключить возможность передачи инфекции при повторном использовании даже после стерилизации (шприцы, иглы системы сбора крови, упаковка и т. д.). Наибольшее распространение получили шприцы. Самых разных объемов и конструкций, с иглами и без игл, для подкожных инъекций, шприцы одноразового использования выпускаются миллионами штук в год и подвергаются лучевой стерилизации.

Ограничение в многократном использовании изделий из пластика зависит от степени радиационной стойкости полимерного материала, который изменяет свою структуру, деформируется, теряет эластичность, прочность и прозрачность, выделяет вещества, оказывающие на организм токсическое действие. Например, полипропилен, используемый для изготовления шприцев, в результате радиационной стерилизации изменяет цвет и становится хрупким, поэтому в него вводят некоторые добавки.

Пластмассовые шприцы производятся и стерилизуются радиационным способом в ведущих странах мира (в России, США, Англии, Швеции, Дании, Норвегии, Финляндии, Франции, Канаде, Италии, Германии и др.). Обычно каждый шприц (с иглой или без иглы) имеет индивидуальную упаковку, обеспечивающую стерильность изделия после лучевой обработки в течение длительного срока (1–2 года). В США и Англии для стерилизации шприцев принята доза 25 кГр, а в Скандинавских странах минимальная стерилизующая доза равна 32 кГр при стерилизации на  $\gamma$ -установках и 35 кГр при стерилизации на ускорителях. Как показали исследования, для достижения бактерицидного эффекта при наличии высокорезистентных бактерий требовалась доза, значительно превышающая 25 кГр.

**Имплантаты.** Для изготовления биосовместимых материалов используются разные подходы. Одними из наиболее привлекательных являются радиационные биотехнологии.

В качестве биоматериалов для изготовления имплантатов используются синтетические полимеры. После радиационной обработки имплантаты хорошо совместимы с кровью и не вызывают воспалений. Они применяются в хирургии, в зубоврачебной технике. Их недостаток — наличие токсичных веществ, которые могут вымываться в водную биологическую среду.

Примером метода получения биосовместимых материалов является прививочная полимеризация<sup>93</sup>. Прививочная полимеризация представляет собой один из наиболее перспективных современных методов получения модифицированных полимерных материалов. Они совмещают в себе различные и даже противоположные свойства. Такие полимеры состоят из макромолекул разветвленной конфигурации. Основная их цепь построена из звеньев одного

<sup>93</sup> Подробно описана в гл. 2.

типа, а боковые цепи — из звеньев другого типа. Преимуществом радиационного сшивания является сравнительная простота выполнения. Кроме того, возникает возможность широкого регулирования густоты сетки сшивания путем подбора условий облучения (мощность дозы, доза). При этом могут использоваться пониженные температуры. В случае радиационного сшивания обеспечивается чистота получаемого материала и одновременная стерилизация. Этот метод наиболее часто применяется для получения гидрогелей. Радиационно-сшитые гидрогели используются для изготовления ферментов, лекарств. Они используются в качестве имплантатов, протезов, глазных линз, медицинских мембран, перевязочных материалов.

**Стерилизация крови.** Ионизирующие излучения применяются для радиационной стерилизации крови (системы переливания и взятия крови, мешки для хранения крови). Системы службы крови состоят из различных составных частей: трубки, капельницы, фильтры, иглы, зажимы. Все эти части сделаны из различных полимерных материалов и из металла. При ручной сборке частей системы происходит их загрязнение, и поэтому требования к стерильности систем службы крови значительно выше по сравнению со шприцами или катетерами, не требующими ручной сборки. Для такой стерилизации необходимо обеспечить поглощенную дозу от 25 до 50 кГр. Это позволяет повысить качество стерилизации, а также срок хранения крови. Системы службы крови и использование их для организма с пониженной устойчивостью к инфекции, для ослабленного организма требуют особенно внимательного подхода к выбору стерилизующей дозы облучения. В этом случае для большей гарантии предпочитают облучать в дозах, приближающихся к 40 кГр или даже более высоких — 42–45 кГр.

В настоящее время для этих целей применяются установки на основе источников  $\gamma$ -излучения (обычно  $^{137}\text{Cs}$ ), например установка Biobeam-8000 производства фирмы Medizintechnik GmbH (Германия). В таких установках облучаемый материал размещают в контейнере, который вращается относительно источника излучения, чтобы получить равномерность дозы облучения. Однако при использовании этих установок возникает ряд проблем, среди которых основные — это необходимость утилизации радиоактивных источников и их опасность в нерабочем состоянии.

Решать проблемы, возникающие при использовании радиоактивных источников, позволяют установки, в которых применяется рентгеновское излучение. Такая установка Radgil создана фирмой Gilardoni (Италия). В ней пакеты с донорской кровью располагают в пределах конуса излучения рентгеновской трубки на лотках различной высоты и диаметра.

В России запатентован и запущен в производство аппарат «АРДОК-1» фирмы ООО «НПП «ВЭЛИТ», который используется для облучения жидких объектов, в частности донорской крови и ее компонентов.

В установке обеспечивается перемешивание крови и ее компонентов при облучении с использованием двух рентгеновских трубок для обеспечения равномерности поглощенной дозы во всем объеме облучаемого объекта, а также исключение возможности его выхода из зоны облучения трубок. Схема работы аппарата «АРДОК-1» приведена на рис. 3.4.

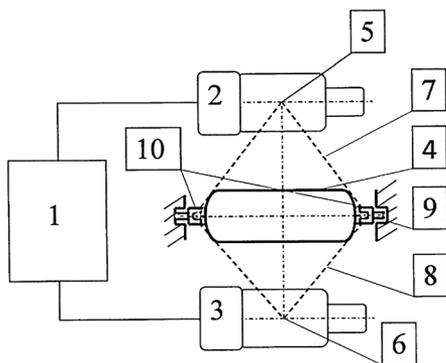


Рис. 3.4. Схема работы аппарата «АРДОК-1»

Установка для облучения донорской крови содержит источник питания 1, соединенный с рентгеновскими трубками 2, 3. Контейнер 4 для размещения облучаемого материала расположен симметрично между фокусами 5 и 6 рентгеновских трубок 2, 3, конусное излучение которых направлено встречно с одинаковой мощностью. Контейнер 4 представляет собой полую симметрично усеченную сферическую фигуру, вписанную в конусы 7, 8 излучения рентгеновских трубок 2, 3. Он укреплен с возможностью колебаний с равной амплитудой относительно горизонтальной плоскости вокруг оси 9 (благодаря направляющим 10), расположенной в горизонтальной плоскости симметрии контейнера 4 и пересекающейся с осью, соединяющей фокусы 5, 6 рентгеновских трубок 2, 3.

Установка обеспечивает диапазон поглощенной дозы облучения 25–50 Гр, который определяется мощностью рентгеновских трубок и расстоянием между их фокусами. Используются рентгеновские трубки типа 03БПМ25–150 производства фирмы «Светлана» (Россия). Трубки располагаются на расстоянии 514 мм между их фокусами. Анодное напряжение равно 150 кВ, ток рентгеновского излучения — 1.56 мА.

### 3.3. Радиационная обработка продуктов питания

Ежегодно в мире облучается ионизирующим излучением более 400 тысяч т пищевой продукции (более 80 видов пищевых продуктов в 69 странах мира), в том числе в Китае 200 тыс. т, в США — 103 тыс. т (в США это, например, мясо (фарш), овощи, фрукты, какао, кофе, яйца, овсяные хлопья, пиво, консервы, приправы и сгущенное молоко). Мировой рынок услуг по облучению

продуктов питания и сельскохозяйственной продукции составляет к 2016 г. ~\$2.3 млрд. Прогнозируется увеличение рынка по облучению продуктов питания к 2020 г. до \$4.8 млрд, а к 2030 г. — до \$10.9 млрд. В мире действует более 1800 центров обработки сельскохозяйственной продукции и продуктов питания, в том числе 1500 ускорителей электронов и 300 кобальтовых установок. Наибольшее количество таких центров действует в США и Китае — более 530 и более 220 соответственно.

Для радиационной обработки пищевых продуктов разрешено применять следующие виды ионизирующих излучений: электронное излучение с энергией не более 10 МэВ;  $\gamma$ -излучение  $^{60}\text{Co}$  ( $E = 1.25$  МэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $E = 0.66$  МэВ); тормозное излучение, генерируемое ускорителями с энергией не более 5 МэВ.

Приведем пример использования радиационной обработки продуктов питания в разных странах мира (табл. 3.5).

В России существует три специализированных центра, а также более 10 ускорителей электронов, которые используются для радиационной обработки в научно-исследовательских институтах. Потенциально в нашей стране можно выйти на уровень облучения порядка 250 тыс. т в год. Для этого необходимо построить 30–40 центров радиационной обработки.

Основными направлениями обработки пищевых продуктов пучком электронов или тормозных фотонов являются:

- частичное или временное подавление жизнедеятельности микроорганизмов для увеличения их сроков хранения;
- стерилизация продуктов питания для увеличения времени их хранения без охлаждения;
- интенсификация технологических процессов;
- дезинсекция зерна, зернопродуктов, сухофруктов и приправ;
- ингибирование прорастания.

Метод радиационной обработки продуктов питания в мире начал осваиваться примерно 40 лет назад.

Таблица 3.5

**Радиационная стерилизация продуктов питания  
в некоторых странах мира в 2015 г.**

Страна	Гамма-установки 100 кКи — 10 МКи	Ускорители электронов 200 кэВ — 10 МэВ
США	> 30	> 500
Япония	> 8	> 300
Китай	> 80	> 140
Бразилия	> 7	> 18
Индия	17	4
Россия	~4	~10

Таблица 3.6

**Объемы облученных продуктов питания в некоторых странах мира  
в 2005 и 2010 гг.**

<b>Страна</b>	<b>2005 г., т</b>	<b>2010 г., т</b>
Китай	146 000	> 200 000
США	92 000	> 103 000
Вьетнам	14 200	66 000
Япония	8096	6246
Бельгия	7279	5840
Южная Корея	5394	300
Индонезия	4011	6923
Нидерланды	3299	1539
Франция	3111	1024
Тайланд	3000	1484
Индия	1600	2100
Малайзия	482	785
Польша	687	160
Германия	472	127
Филиппины	326	445
Венгрия	111	151
Чехия	85	27
Пакистан	–	940
Испания	–	369
Румыния	–	17
Эстония	–	10
Россия в 2017 г	~6000	
Всего в этих странах	300 000	400 000

Под радиационной обработкой продуктов питания понимают прохождение через них потоков частиц с целью продления сроков и хранения, уничтожения болезнетворных бактерий и вирусов. Существуют различные методы обработки продуктов питания.

**1. Консервирование высокими температурами** проводят для уничтожения микрофлоры. К этим методам относятся пастеризация и стерилизация. Асептическое консервирование — это стерилизация продуктов при температуре 130–150 °С с последующим охлаждением; стерилизация тары радиационной обработкой, которая применяется для жидких и вязких продуктов (молоко, соки, вина, паста и др.).

**2. Использование обеспложивающих фильтров.** Суть этого метода состоит в механическом отделении товара от возбудителей порчи с использованием фильтров с микроскопическими порами. Он применяется для обработки молока, пива, соков, вина и других жидких продуктов.

**3. Облучение ультрафиолетовыми лучами (УФЛ)** с длиной волны 60–400 нм. Применяют для обработки поверхности мясных туш, крупных рыб, колбасных изделий, а также для дезинфекции тары, оборудования, камер холодильников и складских помещений. Действие УФЛ на микроорганизмы связано с повреждающим воздействием коротковолнового ультрафиолета на ДНК и образованием фотопродуктов, вызывающих либо гибель, либо мутации микроорганизмов в зависимости от вида патогенов и биологически эффективной дозы. Гибель патогенов происходит при УФ облучении с короткой длиной волны (250–260 нм). Так, летальный эффект УФЛ с длиной волны около 260 нм объясняется тем, что именно в этой области лежит максимум поглощения УФ радиации молекулами ДНК и РНК. Микроорганизмы обладают различной чувствительностью к ультрафиолетовым лучам. Дрожжи, плесневые грибки и споры бактерий гораздо устойчивее к их действию, чем вегетативные формы бактерий. Чувствительность микроорганизмов к УФИ особенно велика в период деления и непосредственно перед ним.

**4. Лазерное излучение** представляет собой фокусированное в виде пучка монохроматическое электромагнитное излучение в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового спектров. Оно обладает очень большой энергией и способно вызывать сильное биологическое воздействие. Под влиянием лазерного излучения повышается температура биологических тканей, происходит коагуляция белков и разрушение клеток. Ультрафиолетовый спектр лазерного излучения обладает более высоким бактерицидным действием, чем синий и красный. В зависимости от природы спектра, мощности излучений и продолжительности облучения можно получить как стимулирующий, так и ингибирующий (подавление роста) и летальный эффекты.

**5. Механизм действия сверхвысокочастотного излучения (СВЧ-излучение)**, включающего в себя сантиметровый и миллиметровый диапазон радиоволн от 30 см (частота 1 ГГц) до 1 мм (300 ГГц), основан на явлении диэлектрической поляризации — перемещении в некоторых ограниченных пределах связанных электрических зарядов — диполей. Под действием внешнего переменного электромагнитного поля в материале происходит их колебательное движение и переориентация, в результате которых возникают токи проводимости и смещения. Совокупность обоих явлений и обеспечивает нагрев материала. Вызывая нагревание среды, СВЧ-излучение действует губительно на микроорганизмы. Основной причиной гибели микроорганизмов является повреждение клетки под влиянием высоких температур.

**6. Консервирование ультразвуком** (более 20 кГц). Используется для пастеризации молока, в безалкогольной промышленности, для стерилизации консервов. Ультразвуковые колебания ускоряют многие химические реакции, вызывают распад высокомолекулярных соединений, коагуляцию белков, инактивацию ферментов и токсинов, могут привести к разрыву

клеточной стенки и иногда — к разрушению внутриклеточных структур. Летальное действие УЗ начинает проявляться при интенсивности 0.5–1.0 Вт/см<sup>2</sup> и частоте колебаний порядка десятков кГц. Основной причиной гибели микроорганизмов является особый эффект, называемый кавитацией. При прохождении в жидкой среде ультразвуковых волн в ней образуются мелкие разрывы, которые под действием сил поверхностного натяжения жидкости принимают форму пузырьков. В момент захлопывания кавитационного пузырька возникает мощная гидравлическая ударная волна, обладающая сильным разрушительным действием.

С 1904 г. технология радиационной обработки сельскохозяйственной продукции и продуктов питания прошла целый ряд этапов развития<sup>94</sup>. Было установлено, что обработка продуктов сернистым газом и другие методы химической стерилизации наносят вред озоновому слою Земли<sup>95</sup>, поэтому появилось предложение — облучать продукты  $\gamma$ -лучами от радиоактивных источников или пучками фотонов и электронов на ускорителях заряженных частиц. Метод оказался эффективным — продукты не портились. Более того, они сохраняли свои вкусовые качества и внешний вид. Радиационная обработка продуктов питания была одобрена Всемирной организацией здравоохранения. На основании результатов, полученных в крупнейших научных центрах мира в рамках выполнения международных проектов в области облучения пищевых продуктов, последующего анализа результатов ведущими экспертами в области токсикологии, микробиологии, питания и химии в 1980 г. Объединенный комитет экспертов МАГАТЭ и ВОЗ дал заключение, согласно которому облучение любого пищевого продукта с общим средним уровнем дозы до 15 кГр не создает никакой токсикологической опасности. Электронная обработка продуктов до уровня доз 20 кГр не вызывает вкусовых проблем при их потреблении, а также изменений в микробиологии.

<sup>94</sup> Основные исторические вехи в развитии технологий радиационной обработки сельскохозяйственной продукции и продуктов питания:

- 1904 г. — Самуэль Прескотт впервые описал бактерицидные эффекты ионизирующего излучения;
- 1906 г. — Дж. Аплеби и А. Бэнкс зарегистрировали в Великобритании первый патент на радиационную обработку пищевых продуктов;
- 1943 г. — радиационная технология принята для обработки продукции в армии США;
- 1953 г. — заменено замораживание и консервирование на радиационную стерилизацию;
- 1951 г. — национальная комиссия по атомной энергии США разворачивает ширококомасштабные научные исследования радиационной обработки продуктов;
- 1950–1970-е гг. — исследования радиационной обработки продуктов начаты в западной Европе и в СССР;
- 1958 г. Минздрав СССР разрешил облучение картофеля и зерна;
- в 1958–1983 гг. в нашей стране было разрешено облучение ряда продуктов питания (овощи, фрукты, мясо и мясные изделия, рыба, консервы, крупы, мука, специи).

<sup>95</sup> В последние годы надзорные органы многих стран считают, что в продуктах питания остаются частицы применяемых для стерилизации химических элементов.

Достоинство радиационной обработки в том, что обрабатываемая продукция находится в упаковке. Это исключает ее последующее загрязнение. Кроме того, при таком методе обработки отсутствует необходимость создания специальных температурных режимов.

В это же время Международная комиссия «Кодекс Алиментариус» приняла свод международных стандартов, касающихся облучения пищевых продуктов, который содержит руководящие нормы по гигиене, дозиметрии, обработке, маркировке облученных пищевых продуктов.

В России также разработаны и действуют санитарные нормы для обработки питания. Они включают в себя:

- условно-патогенные микроорганизмы (*E. coli*, *S. aureus*, бактерии рода *Proteus*, *B. cereus* и сульфитредуцирующие клостридии, *Vibrio parahaemolyticus*);
- патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы и *Listeria monocytogenes*, бактерии рода *Yersinia*;
- микроорганизмы порчи (дрожжи и плесневые грибы, молочнокислые микроорганизмы).

Для их уничтожения необходимы разные дозы. Они представлены в табл. 3.7.

Исторически первым таким направлением радиационной обработки продуктов питания стало облучение картофеля и лука с целью предупреждения их прорастания при хранении. Для этого использовались самые низкие дозы ионизирующей радиации 0.06–0.1 кГр.

Вторым направлением стало облучение зерна для уничтожения в нем амбарных вредителей при дозах до 0.1 кГр. Третье направление охватило широкий спектр продуктов для частичного или временного подавления жизнедеятельности микроорганизмов с целью удлинения сроков хранения пищевых продуктов.

В настоящее время в мире, по данным МАГАТЭ, как уже отмечалось, насчитывается более 300  $\gamma$ -установок и более 1500 ускорителей, используемых для обработки продуктов питания и стерилизации медицинских изделий. Наибольшее количество ускорителей установлено в США (более 500) и Японии (более 300).

Таблица 3.7

Дозы, необходимые для уничтожения наиболее распространенных в продуктах питания бактерий

Микроорганизмы	Доза, кГр	Микроорганизмы	Доза, кГр
<i>Salm. Typhimurium</i>	3	<i>Sarcina lutea</i> Bac. <i>Pumilus</i> (споры)	15–17
<i>E. Coli</i> , <i>Str. Faecalis</i>	6	<i>Bac. Sabtilis</i> (споры), <i>Clostr. Sporogenes</i> (споры), <i>Aspergillusniveus</i>	20
<i>Micobacteruberculosis</i>	10	<i>Clostr. botulinum</i>	90

В России из действующих в этой области ускорителей инновационными по своей технической сущности являются компактные импульсные сильно-точные ускорители электронов, позволяющие получить большую мощность дозы в импульсе и снизить энергозатраты на их эксплуатацию, например такие как ИЛУ-6, ИЛУ-10. Однако число используемых в этих целях ускорителей в нашей стране не превышает двух-трех десятков. Для облучения продуктов питания используют линейные и высоковольтные ускорители электронов с энергией 1–10 МэВ. В табл. 3.8 представлены характеристики некоторых отечественных ускорителей, используемых для обработки продуктов питания.

Ускоритель ИЛУ-10, созданный ИЯФ (Новосибирск), представлен на рис. 3.5. Наиболее подходящими источниками  $\gamma$ -излучения являются  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , так как они обладают относительно высокой энергией  $\gamma$ -лучей и довольно длительным периодом полураспада (30.1 лет для  $^{137}\text{Cs}$  и 5.27 лет для  $^{60}\text{Co}$ ). Уменьшение уровня активности источника кобальта составляет 50% примерно за 5.5 лет, или около 12% в год. Дополнительные капсулы  $^{60}\text{Co}$  периодически добавляются к исходным источникам, чтобы сохранить требуемую мощность облучателя. Срок полезного использования облучателя обычно составляет 20 лет. Для  $^{137}\text{Cs}$  срок использования может достигать 50 лет.

Для полномасштабного облучения используются панорамные облучатели. В них источник (состоит из нескольких капсул  $^{60}\text{Co}$ ) располагается с разных сторон по отношению к облучаемому объекту.

Одна из самых эффективных конструкций для облучения состоит в том, чтобы поместить продукт в контейнеры для облучения и перемещать их вокруг источника излучения. Такие контейнеры универсальны, в них можно поместить продукцию, которая содержится в ящиках, мешках или бочках. В зависимости от конструкции облучателя контейнер может вместить несколько сотен килограммов продукта. Контейнеры перемещаются вокруг источника излучения на конвейере, как правило, в четыре ряда (два с каждой стороны от источника) и на двух уровнях.

Таблица 3.8

Ускорители для обработки продуктов питания

Ускоритель	ИЛУ-10	ИЛУ-12	ИЛУ-14
Параметры пучка (энергия, мощность)	5 МэВ 50 кВт	5–7.5 МэВ 60 кВт	7.5–10 МэВ 100 кВт
Глубина обработки • электроны • тормозное излучение (1 сторона)	4 г/см <sup>2</sup> 30 г/см <sup>2</sup>	6 г/см <sup>2</sup> 30 г/см <sup>2</sup>	8 г/см <sup>2</sup> 30 г/см <sup>2</sup>
Производительность для дозы 1 кГр • электроны • тормозное излучение	90 т/ч 4.5 т/ч	108 т/ч 8 т/ч	180 т/ч 13.5 т/ч

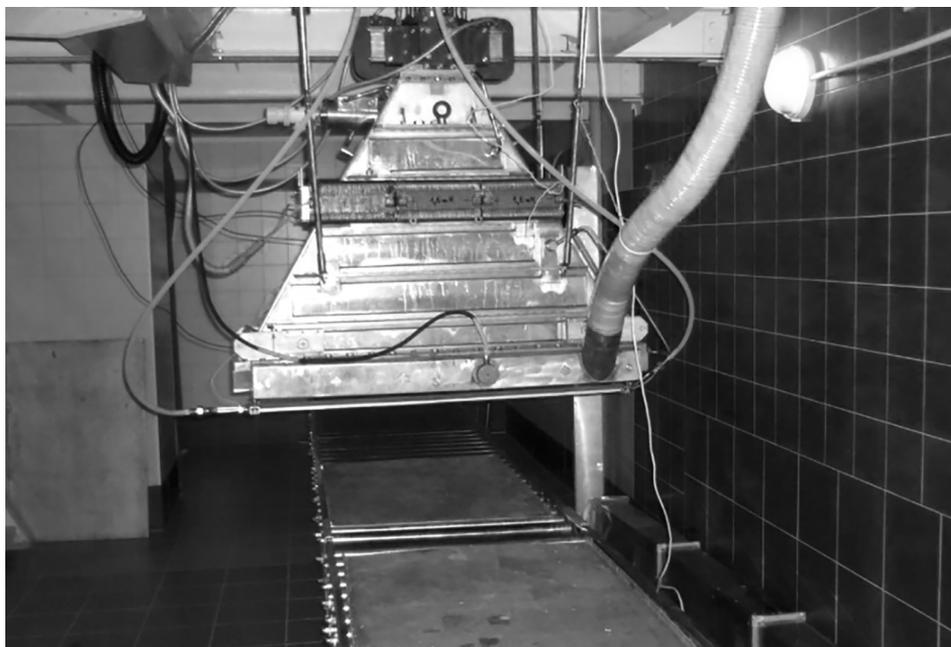


Рис. 3.5. Внешний вид ускорителя ИЛУ-10

На рис. 3.6 представлен радиационный стационарный комплекс для облучения продукции сельского хозяйства и пищевой промышленности с использованием мощной  $\gamma$ -установки на базе источника  $^{60}\text{Co}$ .

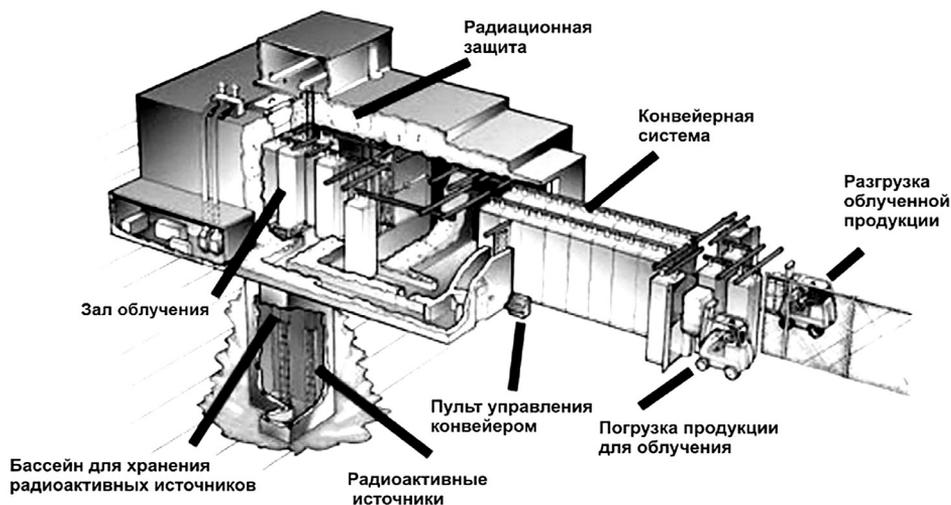
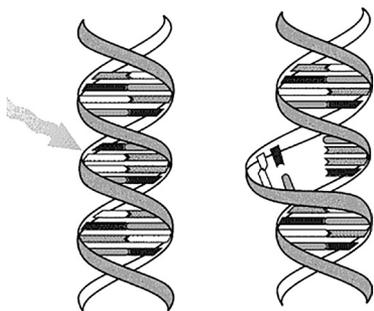


Рис. 3.6. Комплекс для обработки продуктов питания

**Механизм действия ионизирующего излучения на продукты питания.**

Механизм облучения продуктов питания заключается в следующем<sup>96</sup>. Ионизирующее излучение уничтожает микробные загрязнения, включая микроорганизмы, вызывающие порчу продуктов в результате прямого воздействия на ДНК либо образование радикалов и ионов, которые разрушают ДНК (рис. 3.7). При облучении пищи пучок частиц воздействует не на атомное ядро, а на атомные электроны, что приводит к химической реакции. Последующее влияние на биологическую ткань представляет собой сумму прямого (или первичного) и непрямого (или вторичного) воздействия.



**Рис. 3.7.** Разрушение ДНК живых болезнетворных микроорганизмов заряженными частицами

Первичный эффект вызывается либо пучком электронов из ускорителя, либо электронами, возникающими в результате фотоэффекта, комптоновского рассеяния, а при высоких энергиях и механизмом образования электрон-позитронных пар. В результате него может произойти ионизация атома, диссоциация молекулы с отрывом от нее атома водорода и возбуждение молекулы воды.

В этом случае возникают свободные радикалы, которые вступают в большое число вторичных реакций. Среди них значительную роль играет рекомбинация, захват свободных электронов, присоединение других молекул,

присутствующих в пище. Поэтому может быть образовано вещество, которого не было в исходном продукте.

В результате радиолитического разложения образуются нестабильные реактивные продукты, которые впоследствии превращаются в стабильные конечные продукты. Между дозой облучения и количеством генерированных радиолитических продуктов существует линейная зависимость. Фактически обнаруженные радиолитические продукты такие же, как и продукты, возникающие при нагревании или освещении солнечными лучами.

Температура и физическое состояние пищи влияют на результаты процесса облучения. Например, замораживание оказывает защитное влияние во время облучения, предупреждая образование продуктов радиолитического разложения воды, которые образуются в результате реакции с субстратом. При нагревании эти продукты (гидроксильные радикалы) имеют тенденцию реагировать преимущественно друг с другом. Например, во время облучения замороженной пищи генерируются высокорективные радикалы и пероксид водорода.

<sup>96</sup> Детально механизмы передачи энергии различных типов ионизирующих излучений биологическим объектам описаны в п. 3.1.

В агрокомплексе обработка ионизирующим излучением осуществляется с целью улучшения или придания новых свойств продукции. Она базируется на механизме воздействия ионизирующего излучения на клеточном и внутриклеточном уровне на живые организмы и включает либо ряд событий стимулирующего действия на живой организм низких доз излучения, либо подавление и поражение частично или полностью клеточных структур «вредных» растительных или животных организмов.

К положительным эффектам воздействия радиации на продукты питания можно отнести:

- стимуляцию развития растений на ранних этапах дозами 2–50 Гр;
- ингибирование прорастания хранимых растительных продуктов дозами 50–200 Гр;
- подавление гниения овощей и фруктов воздействием на клеточные структуры плесневых грибов дозами 500–800 Гр, что приводит к увеличению срока хранения;
- поражение патогенного микробиологического загрязнения растительной продукции дозами до 3–8 кГр, позволяющими уничтожить неспорообразующие микроорганизмы с целью повышения сроков хранения в незамороженном виде;
- поражение ДНК большей доли насекомых и иных животных организмов-паразитов и вредителей дозами 200–500 Гр и до 3 кГр;
- полное уничтожение репродуктивных микроорганизмов на продуктах — стерилизация пищи для определенных целей дозами до 30–35 кГр.

Величина дозы облучения зависит от вида продукта и характера и интенсивности его микрофлоры. Различают:

1) радуризацию — уничтожение вегетативных форм микроорганизмов, дрожжей и плесеней, вызывающих порчу пищевых продуктов путем обработки пищевых продуктов низкими дозами (1–8 кГр), достаточными для увеличения длительности хранения;

2) радисидацию — увеличение длительности хранения продуктов средними дозами 5–10 кГр. Такая обработка достаточна для инактивации жизнеспособных бактерий, не образующих спор, например сальмонелл. По эффективности этот метод близок к пастеризации.

3) радаппертизацию — радиационная стерилизация достигается дозами 40–60 кГр, почти полностью уничтожающая практически все микроорганизмы, включая спорообразующие.

В табл. 3.9 представлены дозы и виды продуктов, обрабатываемые такими дозами.

Для радиационной обработки продуктов питания используются в основном линейные ускорители с энергией 5–10 МэВ.

Как видим, дозы, безопасные при облучении продуктов, составляют 0.05–10 кГр. Приведем несколько примеров.

Дозы и виды обрабатываемых продуктов

Назначение обработки	Доза (кГр)	Объекты обработки	Год одобрения
Задержка прорастания	0.05–0.15	картофель, лук, корнеплоды и др.	1964 (только картофель), 1986
Дезинсекция (уничтожение насекомых)	0.15–0.5	зерновые, сушеные овощи, фрукты и др.	1963 (только зерно и мука), 1986
Замедление процессов созревания	0.5–3.0	свежие фрукты и овощи	1986
Удлинение сроков хранения	1.0–3.0	ягоды, фрукты, овощи	1986
Подавление развития патогенных микроорганизмов	1.0–7.0	свежее мясо, птица, рыба, полуфабрикаты	1990 (птица) 1997 (мясо)
Деконтаминация добавок и ингредиентов	10–30	специи, ферментные препараты и др.	1983, 1986

**Корнеплоды.** Прорастание корнеплодов, таких как картофель, морковь, лук, чеснок, свекла, может быть ингибировано дозами 0.05–0.15 кГр. Грибы при облучении дозой до 1 кГр могут храниться дольше на 5–7 дней.

Облучение клубней картофеля дозой 0.03–0.15 кГр полностью подавляет прорастание из-за значительных изменений в точках роста (глазках) и серьезных нарушений обмена веществ, особенно синтеза ДНК и РНК. В экспериментах, выполненных в МГУ, показано, что картофель, обработанный ионизирующим излучением (пучком электронов при энергии 1 МэВ), при поглощенной дозе в 44 Гр полностью ингибирует прорастание клубня. Однако при таком облучении клубни в большей степени теряют сопротивление против гнилостной микрофлоры, чем необлученные. Поэтому целесообразно облучать не свежесобранные клубни, а прошедшие определенный период хранения, способствующий образованию раневой перидермы на механически поврежденных участках.

Прорастание лука задерживается при облучении дозой 0.07–0.10 кГр. Для задержки прорастания в весенний период чеснока, сахарной свеклы и моркови достаточно облучить в дозах 0.10–0.12, 0.1 и 0.08–0.1 кГр соответственно.

**Фрукты.** Большое значение имеет лучевая стерилизация скоропортящихся ягод и фруктов. Для стерилизации ягод и фруктов достаточно облучение в дозах 0.050–0.3 кГр. Многие вредители фруктов и овощей, включая плодовых мушек, поражающих картофельные ростки и яблонную плодожорку, погибают при дозе 1 кГр. Облучение тропических и субтропических фруктов, таких как бананы, манго, папайя, в дозах 0.25–1 кГр задерживает созревание и ста-

рение. У фруктов из зон с умеренным климатом, таких как яблоки, груши, созревание подавляется дозами, превышающими 1 кГр.

Клубника относительно устойчива к повреждению ионизирующим излучением. При облучении дозой 2–2.5 кГр в сочетании с охлаждением увеличивается ее срок хранения до 1–2 недель. Так, облучение земляники дозой 0.2–0.3 кГр способствуют увеличению сроков ее хранения при пониженной температуре с 5–6 до 12–13 сут.

Специи и сухофрукты часто содержат большое количество плесени, бактерий и их термостойких спор. Дозы 3–10 кГр значительно увеличивают срок хранения как специй, так и сушеных овощей, трав, других сухих ингредиентов, а дозы 10–50 кГр приводят к практически полному их обеззараживанию. Исследования в Институте питания РАН и НИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана подтвердили безопасность использования в питании продуктов, прошедших радиационную обработку: сушеных фруктов, обработанных дозой до 3 кГр, концентратов — дозой 700 Гр. При этом вкус, цвет, запах и питательная ценность облученных продуктов не имеют отклонений от нормы, а вредные микроорганизмы и насекомые уничтожаются.

**Зерно.** Облучение зерна на элеваторе пучком тормозного  $\gamma$ -излучения предотвращает развитие вредных бактерий до посевной кампании, а дозы порядка 1 кГр уменьшают потери от насекомых в хранящемся зерне, муке, зерновых и бобах кофе. Подобное использование ионизирующей радиации позволяет успешно бороться с насекомыми-вредителями муки, зерна и крупы, такими как амбарный долгоносик и мельничная огневка. Хотя взрослые насекомые очень устойчивы к действию излучений (сотни тысяч рентген или единицы кГр), их половые клетки достаточно чувствительны даже к сравнительно меньшим дозам облучения. Это приводит к полной стерильности взрослых форм. Перед загрузкой зерна в элеваторы производят его облучение дозой 0.10 кГр, что полностью прекращает развитие яиц и личинок амбарного долгоносика с полной стерилизацией взрослых особей. При дозе 0.2 кГр<sup>97</sup> уничтожаются амбарный долгоносик, зерновой точильщик и суринамский мукоед. Так, например, в США работает стационарная  $\gamma$ -установка для радиационной обработки в потоке собранного зерна производительностью 2.3 т/ч при дозе 0.25 кГр. Во Франции действует аналогичного типа установка с производительностью 4 т/час при дозе 0.2 кГр, а в Англии — с производительностью 30 т/ч при дозе 0.16 кГр.

В нашей стране Институтом ядерной физики Сибирского отделения АН с участием ВНИИ зерна и зернопродуктов разработана и действует установка на основе ускорителя электронов производительностью до 100 т/ч.

<sup>97</sup> Дозы для комплекса вредителей составляют 0.10–0.5 кГр, в том числе мельничной огневки — 0.25 кГр, рисового долгоносика — 0.1кГр, зернового долгоносика — 0.16 кГр.

Таблица 3.10

## Питательность облученного и необлученного замороженного говяжьего фарша

Содержание питательных веществ и витаминов	Необлученные образцы	Облученные образцы
Протеин (по Дюма)	16.6	16.7
Железо, мг	2.19	2.31
Цинк, мг	3.89	3.97
Ниацин, мг	4.68	4.82
Витамин В6, мг	0.200	0.140
Витамин В12, мг	1.60	1.70
Фосфор, мг	135	135

Для рассматриваемой технологии определяющим физико-механическим свойством зерна является сыпучесть (текучесть), поэтому создаются установки на основе кобальтовых источников и ускорителей (линейных или бетатронов) с энергией до 5 МэВ.

**Мясо и птица.** Для увеличения срока хранения герметически закрытые мясные консервы облучаются  $\gamma$ -излучением, в результате которого уничтожаются штаммы ботулизма. Надежная ликвидация этих бактерий происходит при дозе 45 кГр. К значительному увеличению срока хранения мяса приводит заморозка одновременно с облучением 25–45 кГр. При этом большинство микроорганизмов, вызывающих его порчу, уничтожается субстерилизующими дозами ионизирующей радиации. Большая часть сырого мяса, предназначенного для потребления человеком, загрязнена *Salmonella* и *Campylobacter*, погибающими при дозе 2–3 кГр. К сожалению, облучение в больших дозах приводит к изменению вкусовых качеств. Однако применение доз порядка 1 кГр уничтожает псевдомонаду и стрихнин и позволяет сохранить сырое мясо и птицу.

Изменения в содержании питательных веществ и витаминов, например в мясе, до и после облучения практически не происходит. Результаты химического анализа облученного и необлученного замороженного говяжьего фарша, находящегося в розничной продаже, представлены в табл. 3.10. Из таблицы видно, что содержание основных веществ, влияющих на вкусовые качества фарша, практически не изменилось.

После облучения 3 кГр мяса птицы количество патогенных бактерий резко снижается, что увеличивает срок хранения продукта на 1–2 недели.

Данные исследований ученых<sup>98</sup> Института естественных наук УрФУ свидетельствуют о наличии свободных радикалов в образцах мяса говядины

<sup>98</sup> Ученые не приняли окончательного решения о полной безопасности метода радиационной стерилизации, поэтому очень важен контроль облученных пищевых продуктов для выявления факта облучения и определения остаточных явлений. Научным коллективом авторов получены экспериментальные данные на отечественном спектрометре ЭПР серии Labrador Expert X, разработанным ООО «Спектр».

бескостной, что может быть связано с возникновением прижизненных технологических и убойных стрессов у животных. Проведенное в лабораторных условиях облучение образцов мяса кур позволяет сравнить полученные спектры до и после облучения. В настоящее время промышленная доза облучения мяса птицы составляет 12 кГр. Указанная доза выбрана, поскольку на практике она считается безопасной (10–12 кГр) во многих странах.

**Рыба.** Технология, основанная на использовании ионизирующего излучения, в рыбной промышленности применяется в следующих направлениях: для улучшения оплодотворяемости и выживаемости рыб, увеличения выхода мальков в рыбном хозяйстве и при искусственном разведении различных видов морских моллюсков (устриц, гребешков и т. д.); для увеличения сроков хранения свежей рыбы и других видов продуктов морского промысла (креветок, крабов и др.); для консервирования рыбы и морепродуктов, для обработки рыбной продукции (кормовой муки, сухой вяленой рыбы и др.) в целях уничтожения сальмонелл или насекомых-вредителей.

Радиационная обработка свежей рыбы дозой 2 кГр увеличивает срок ее хранения до 30 сут., а дозой 4 кГр — до 60 сут. при температуре 2 °С. Технологический процесс заключается в следующем: свежую рыбу разделяют, упаковывают в герметичную упаковку, затем подвергают радиационной обработке и отправляют на хранение. Радуризация рыбы горячего копчения при дозе 2 кГр увеличивает срок ее хранения в 3–4 раза при температуре 5 °С.

В некоторых странах созданы судовые экспериментальные установки для радиационной обработки рыбы и морепродуктов в условиях морского промысла. Низкоэнергетические ускорители электронов с энергией 200 кэВ используются непосредственно на судах для обработки рыбы, а ускорители электронов с энергией 10 МэВ — для ее пастеризации. Оценки показывают, что использование ускорителей экономически более выгодно, чем использование радиоактивных источников и химических препаратов.

Опытно-промышленные установки создаются и на берегу — в рыбоконсервных комбинатах. Например, такой ускорительный комплекс должен быть установлен на Вентспилском рыбоконсервном комбинате, для которого спроектирован цех радиационного консервирования производительностью 800 кг/ч свежей рыбы при дозе 5 кГр.

Опасения, что при стерилизации облучением теряется пищевая ценность продуктов и возникают токсичные или канцерогенные вещества, не подтвердились до настоящего времени. Не обнаружено никаких специфических для радиации токсичных веществ, что подтверждено продолжительными опытами, проводимыми на животных и людях-добровольцах. Питательные свойства продуктов при облучении ухудшаются не более, чем при обычной тепловой стерилизации.

В качестве примера рассмотрим выполненные в МГУ исследования потрошеной охлажденной форели. Исследовалось воздействие пучка ускоренных электронов с энергией 1 МэВ в различных дозах на количество мезофильных аэробных, факультативно-анаэробных микроорганизмов, бактерий и патогенных микроорганизмов в охлажденной форели. Объект исследования — форель потрошенная, охлажденная. Предварительно рыбу разделали, помыли при температуре воды не более +15 °С и упаковали в короба со льдом. Затем транспортировали в течение суток в холодильной камере при температуре от 0 до –2 °С. Непосредственно перед радиационной обработкой рыбу нарезали кусками массой 50 г, размером 20×3 см, толщиной 0.8 см. Все образцы были помещены в полиэтиленовую упаковку. Куски охлажденной рыбы облучались пучком ускоренных электронов, получаемых от промышленного ускорителя электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 на энергию 1 МэВ со средней мощностью пучка 25 кВт. Расстояние от выхода пучка электронов до пластины составляло 12 см.

Все эксперименты проводились при температуре 18 °С, температура облучаемой пластины, на которую помещались образцы во время облучения, составляла 12 °С. Образцы облучались в пяти различных дозах.

Далее облученные и контрольные необлученные образцы помещались в контейнеры и транспортировалась в лабораторию при 18 °С, где осуществлялся мониторинг количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КОЕ/г). Полученное значение затем сравнивалось с соответствующим контрольным показателем необлученной рыбы. В лаборатории все образцы хранились при 6 °С. Образцы также проверялись на наличие остаточных радионуклидов и патогенных микроорганизмов.

В ходе экспериментального исследования измерялся падающий на пластину заряд во время облучения специальными датчиками. Для расчета поглощенной дозы в форели было проведено компьютерное моделирование. При помощи программного комплекса GEANT4 моделировали прохождения пучка электронов через кусок рыбы с учетом измеренного поглощенного заряда, всех технических характеристик ускорителя электронов и параметров облучения. По результатам расчетов форель облучалась в дозах 21 Гр, 211 Гр, 2.1 кГр, 6 кГр, 21 кГр.

В результате эксперимента было установлено, что при воздействии пучка ускоренных электронов с энергией 1 МэВ количество мезофильных аэробных, факультативно-анаэробных микроорганизмов уменьшалось с увеличением



Рис. 3.8. Схема облучения объекта пучком ускоренных электронов

дозы облучения в диапазоне доз от 21 Гр до 21 кГр. На третьи сутки хранения КМАФАнМ(КОЕ/г) при облучении в дозе 6 и 21 кГр было меньше, чем в контрольных образцах в 2 и 9 раз соответственно. Патогенные микроорганизмы и остаточные радионуклиды в облученных в дозе 21 кГр образцах не обнаружены даже на девятые сутки хранения.

Далее планируется проводить экспериментальные исследования по подбору оптимальных параметров облучения пучками ускоренных электронов, необходимых для значительного удлинения сроков хранения охлажденной форели при проведении ее радиационной обработки.

### 3.4. Радиация в сельском хозяйстве

**Радиационная селекция и генетика растений.** В настоящее время радиационная селекция<sup>99</sup> стала одним из прогрессивных методов получения разнообразных генетических мутаций для последующего отбора и выведения новых сортов<sup>100</sup>. Она позволяет в течение относительно коротких сроков получать значительное количество полезных мутантов — около 20% от общего количества новых форм. Они обладают повышенной урожайностью, устойчивостью к заболеваниям и неблагоприятным факторам внешней среды, повышенным выходом биологически активных и питательных веществ в урожае.

Облучению чаще всего  $\gamma$ -лучами подвергаются семена или пыльца растений. При этом частота мутаций<sup>101</sup> возрастает более чем в 200 раз. Мутации затрагивают урожайность, скороспелость, засухо- и зимостойкость, размеры самих растений и ряд других признаков. У подавляющей части полученных

<sup>99</sup> Известный американский генетик **Герман Мёллер** (Нобелевская премия по физиологии и медицине, 1946) экспериментально доказал возможность возникновения искусственных мутаций под действием рентгеновских лучей (1927). Последовавшие за этим открытиями работы исследователей многих стран по получению мутационных изменений с помощью воздействия на геном растений различными физическими и химическими факторами подтвердили его открытие. В нашей стране первая подобная статья «Мутации и их значение для селекции» была опубликована в 1935 г.

<sup>100</sup> Если для выведения нового сорта традиционными способами селекционеры тратят не менее 10 лет, то радиационная селекция позволяет получать новые сорта уже через 2–3 года.

<sup>101</sup> В настоящее время считается, что за передачу наследственных признаков организма отвечает дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), в которой четыре основания — тимин, аденин, цитозин, гуанин — расположены в определенной последовательности. Согласно этой теории, изменение последовательности этих оснований в молекуле ДНК — так называемого кода, или их химической структуры, приводит к изменению наследственности организма. Установлено, что при воздействии на клетку химическими веществами или различными излучениями можно вызвать появление новых признаков у растительных организмов, так называемых мутаций. Они могут возникать в живом организме и спонтанно. В этом случае наиболее вероятными причинами возникновения мутаций являются изменения в физиолого-биохимических процессах, протекающих в самой клетке.

мутантов преобладают угнетенные нежизнеспособные особи. Поэтому на втором этапе на основе отобранных форм с улучшенными селекционными признаками проводится дальнейшая селекция по выведению, испытанию, генерации и внедрению в практику нового сорта. Ценность используемого в селекции растений радиационного мутагенеза состоит в том, что среди мутантов появляются формы с новыми признаками, не встречавшимися в природе. При этом характер и получаемое число мутантов во многом определяются состоянием исходного материала и, в частности, исходного сорта.

В последние годы были получены новые сорта зерновых, овощных, технических и кормовых культур, обладающие повышенной урожайностью, раннеспелостью и морозостойкостью, устойчивостью к полеганию и заболеваниям при любых погодных условиях. С использованием ионизирующей радиации к настоящему времени в мире получено более 200 сортов различных сельскохозяйственных культур.

Ионизирующие излучения в сельском хозяйстве получили распространение в радиационной генетике и для стимуляции роста растений. Это позволило улучшить всхожесть семян, увеличить урожайность различных сельскохозяйственных культур.

В радиационной генетике<sup>102</sup> для получения растений-мутантов требуются сравнительно высокие дозы излучений. В радиационной генетике, кроме летальной, вводят понятие критической дозы облучения, при которой наблюдается сильное угнетение организмов, но значительная часть их все-таки выживает и дает большое число мутаций. Ядро клетки более чувствительно к облучению, чем цитоплазма. Оно может поражаться при дозе, равной всего нескольким рентгенам, в то время как цитоплазма способна выносить большие дозы. Различие в радиочувствительности ядра и цитоплазмы может достигать величины 100 000 раз и более, а критические дозы колеблются от 4 Гр до 2 кГр.

В радиационной генетике часто используется метод облучения сухих семян. В этом случае на количество и качество мутаций влияют условия их

---

<sup>102</sup> Основоположниками радиационной генетики считаются **Г. А. Надсон, Г. С. Филиппов**, которые в 1925 г. изучали воздействие ионизирующих излучений на наследственную изменчивость дрожжей. В 1930 г. в нашей стране начались исследования в области получения радиационных мутантов сельскохозяйственных культур. Была осуществлена селекция пшеницы А. А. Сапегиним, а также изучены некоторые вопросы зависимости мутаций от мощности доз облучения. А. Н. Лутковым было установлено, что при  $\gamma$ -облучении наиболее часто отмечаются мутации у генов, регулирующих развитие вегетативных органов, меньше подвергались изменению гены, ответственные за формирование органов цветка. К 1940 г. работы были практически прекращены в результате деятельности Т. Д. Лысенко. В этот период за границей, особенно в Швеции, США, Японии, были созданы новые лаборатории и производства. В них были выведены новые сорта и гибриды многих сельскохозяйственных культур, которые давали большие прибавки урожая, были более стойки к заболеваниям. В 1950-е гг. исследования по генетике восстановились и в СССР. В 1960-е гг. ведущими странами уже было выпущено 7 сортов мутантного происхождения, к 1980-м — 120, а в настоящее время — более 200.

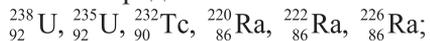
хранения и прорастивания. При малой влажности число мутаций возрастает. То же происходит при облучении незрелых семян.

Так, при облучении незрелых семян гороха дозой 5 Гр количество мутантов возрастало в 3 раза по сравнению с облучением полностью созревших. Облучение сухих семян кукурузы дозой 5 Гр при ее посеве на силос увеличило число початков и на 20% выход зеленой массы. Облученные дозой 3 Гр семена гороха и огурцов дали 20-процентный прирост урожая, а облучение семян редиса дозой 1 Гр сократило срок созревания на неделю. Результативным оказалось и облучение семенного картофеля дозой 3 Гр за неделю до посадки. Облучение семян моркови (25–30 Гр) позволило повысить урожайность на 30%. Таких примеров можно привести много.

Для предпосевного облучения семян сельскохозяйственных культур в полевых условиях промышленностью серийно выпускается установка «Стебель-3», дающая мощность облучения до 0.7 Гр/мин.

**Исследование почвы.** В почве присутствуют практически все радиоактивные элементы, которые находятся в биосфере. Среди объектов биосферы почва обладает наиболее высокой естественной радиоактивностью. Радиоактивность бывает искусственная и естественная. Естественная радиоактивность делится на три группы:

1) изотопы радиоактивны в естественном состоянии:



2) изотопы обычных элементов:  ${}_{19}^{40}\text{K}, {}_{37}^{87}\text{Rb}, {}_{40}^{96}\text{Zr}, {}_{20}^{48}\text{Ca};$

3) радионуклиды, образующиеся в атмосфере под действием космических лучей:  ${}^3_1\text{H}, {}^7_4\text{Be}, {}^{14}_6\text{C}.$

Наибольшую опасность представляют изотопы  ${}_{38}^{90}\text{Sr}, {}_{55}^{137}\text{Cs}$ , так как период их полураспада велик (28 лет и 33 года соответственно) и они легко включаются в биологический круговорот и во все цепи питания. Доля этих элементов в почвах в обычном случае не велика, и они не играют существенной роли в составе почв.

Обычный уровень радиации почв составляет 10–15 мкР/ч. Радиоактивность в живых организмах обладает высокой накопительной способностью. Интенсивность радиоактивного загрязнения определяется, во-первых, концентрацией радиоактивных элементов или их изотопов в почве; во-вторых, периодом полураспада изотопов: чем больше период полураспада, тем более длительное время они воздействуют на человека.

Использование ионизирующих излучений изотопов позволило исследовать различные процессы в почвах, улучшить ее плодородие, изучить вопрос эффективности использования различных удобрений для стимуляции роста сельскохозяйственных культур. Так, применение изотопа  ${}^{14}\text{C}$  дало возможность глубже изучить процесс фотосинтеза — последовательность биохимических реакций, в ходе которых происходит усвоение углерода и образование органи-

ческих соединений, дающих материал для синтеза всех веществ, из которых строятся ткани растений и формируется урожай. С помощью метода меченых атомов стало возможным изучить динамику физиолого-биохимических процессов в растении, обновление состава различных органических и неорганических соединений, когда обычные химические методы не в состоянии выявить эту динамику. Использование радиоактивных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}$  позволило глубже понять процесс разложения органических веществ в почве и разработать новые способы повышения плодородия почвы. Этот метод позволил также установить, что фосфорные удобрения усваиваются картофелем в течение всей вегетации, кукурузой — только в ее начале, а табаку, например, они вообще не нужны.

### 3.5. Радиационная экология

Ускорители заряженных частиц играют существенную роль в уменьшении загрязнения планеты. В радиационной экологии в настоящее время исследования и технологические разработки с использованием ускорителей и радиоактивных источников выполняются в основном для радиационной обработки природной воды, очистки сточных вод, а также дезинфекции их осадков, очистки выбросов газов в атмосферу, обработки твердых бытовых, промышленных и сельскохозяйственных отходов. Особое значение играет переработка отходов атомных электростанций.

Объем мирового рынка ядерно-физических технологий в экологии (очистка воды, утилизация отходов) в 2012 г. составил \$135 млрд, а к 2020 г., по оценкам экспертов, достигнет \$200 млрд. В России в 2012 г. он составлял \$5.8 млрд. Крупнейшие компании, действующие в этой области: General Electric, CNIM, Martin, Babcock Wilcox Volund, Doosan, Veolia.

**Выбросы вредных смесей газа** из труб заводов, тепловых электростанций, автомобилей, особенно в больших городах, — одна из важнейших экологических проблем современного общества<sup>103</sup>. Так, ежегодные выбросы  $\text{SO}_2$  в атмосферу во всем мире составляют примерно 108 т, а выбросы  $\text{NO}_2$  достигли величины более 4107 т. Главный источник этих выбросов — тепловые электростанции (в основном работающие на каменном угле).

При очистке газов из фабричных дымовых труб необходимо устранять диоксиды серы и оксиды азота ( $\text{NO}_x$ )<sup>104</sup>, которые смешиваются с водяным паром

<sup>103</sup> Исследования рассматриваемой проблемы были начаты в начале 1970-х гг. в Японии. Там же была запущена первая установка по очистке выбросных газов.

<sup>104</sup> Под термином «оксид азота» формула  $\text{NO}_x$  объединяет в себе три вещества:  $\text{NO}$  (одноокись азота),  $\text{NO}_2$  (двуокись азота),  $\text{N}_2\text{O}$  (закись азота).

в атмосфере и приводят к выпадению кислотных дождей и образованию смога. Современные средства очистки удаляют серу посредством известняковой промывки дыма. Таким же образом удаляется азот. Использование пучков электронов позволяет удалять соединения и серы, и азота одновременно, не образуя отходов.

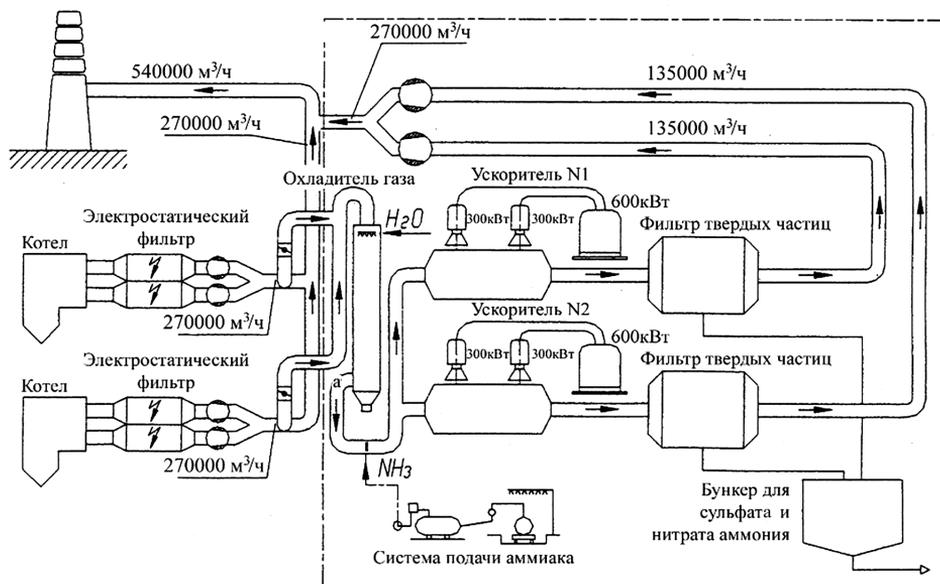
Пучки электронов применяются в радиационных технологиях по очистке выбросов газов от вредных примесей во многих странах. Энергия пучка электронов, достаточная для этой цели,  $\sim 0.3\text{--}1.0$  МэВ. Они, взаимодействуя с основными компонентами газов ( $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ), образуют в них электроны, ионы, возбужденные атомы и молекулы, свободные радикалы, которые, реагируя с окислами, окисляют их в присутствии паров воды до соответствующих кислот. Дозы, необходимые для очистки вредных примесей, например  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$ , составляют  $10\text{--}20$  кГр, в зависимости от концентрации.

Технологически процесс очистки выхлопных газов начинается с этапа охлаждения газа посредством добавления воды и аммиака  $\text{NH}_3$ . Далее газ поступает в химический реактор, где он облучается пучком электронов с энергией порядка  $1.5$  МэВ, что вызывает химические реакции, превращающие диоксиды серы и оксиды азота в сульфаты и нитраты аммония соответственно. При введении в зону реакций химических активаторов (кислород, аммиак) облучение выбросных газов пучком электронов с энергией в пределах  $0.3\text{--}1.0$  МэВ и дозой облучения  $\sim 20$  кГр обеспечивает эффективность удаления  $\text{SO}_2$  до 95%,  $\text{NO}_x$  — до 85%. Очищенный дымовой газ выходит наружу через дымоход. Образовавшиеся при этом твердые продукты переработки (являющиеся смесью сульфатов и нитратов аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) могут применяться как компоненты минеральных удобрений или вновь использованы в технологическом процессе.

Опытные заводы в Германии, Японии, Корее, Польше и США использовали технологию электронных пучков, предложенную в 1970 г. для очистки дымовых газов. В этих странах в настоящее время эксплуатируется несколько пилотных установок производительностью  $10\text{--}20$  тыс  $\text{м}^3$  газов в час, а также шесть промышленных установок производительностью более  $100$  тыс.  $\text{м}^3$  газов в час. Они показали высокую эффективность удаления загрязняющих веществ. В промышленных масштабах эта технология применяется в настоящее время в Польше и Китае.

Первые подобные проекты реализованы в Польше. Крупнейшая установка, основанная на этих технологиях, находится на электростанции *Porngozany*. Она очищает около  $270$  тыс.  $\text{м}^3$  дымовых газов в час. Побочным продуктом этой установки являются высококачественные удобрения.

На рис. 3.9 изображена схема такой демонстрационной установки, сооруженной в Щецине. Дымовые газы от двух котельных агрегатов, мощностью  $56$  МВт каждый, работающих на угле, сначала очищаются от твердых частиц



**Рис. 3.9.** Схема пилотной установки радиационной очистки газов на ТЭЦ в Щецине

системой электростатических фильтров. Затем половина потока после охлаждения распыленной струей воды и добавки некоторого количества аммиака  $\text{NH}_3$  поступает в два радиационно-химических аппарата, где происходит обработка газосмеси четырьмя электронными пучками двух ускорителей общей мощностью 1200 кВт.

В результате химических реакций, происходящих после облучения, образуются твердые частицы нитратов и сульфатов аммония. Последние улавливаются электростатическим фильтрами и поступают в накопительный бункер. Полученное вещество является экономичным сельскохозяйственным удобрением. Содержание окислов азота в газах после обработки снижается более чем в 3 раза, а оксидов серы — в 10 раз.

Эффективность удаления  $\text{NO}_x$  можно повысить, применяя двухстадийное облучение. Именно такой прием осуществлен в пилотной установке на ТЭС в Щецине, схема которой приведена на рис. 3.7. В случае двухстадийного облучения доля удаленных газов выше, чем при одностадийном.

Опыты на различных пилотных установках показали также более высокую эффективность удаления  $\text{NO}_x$ , когда при той же поглощенной дозе имеет место более высокая концентрация  $\text{SO}_2$ . Это может быть объяснено поглощением  $\text{NO}_2$  в сернокислом тумане, образуемом возрастающей концентрацией  $\text{SO}_3$ . Данное обстоятельство может представить дополнительный интерес для предприятий, работающих на угольном топливе. Радиационная очистка окажется

здесь вдвойне выгодной: помимо резкого уменьшения при соответствующей дозе концентрации  $\text{SO}_2$  она дает большее по сравнению с печами, работающими на других топливах, снижение концентрации  $\text{NO}_x$ .

Среди заводов, где используется этот процесс («Эбара процесс»):

- Япония, компания Эбара; ускоритель с энергией 0.75 МэВ, мощностью 45 кВт; обрабатывается объем газов  $(3-10) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- США, Индианаполис; 2 ускорителя с энергией 0.8 МэВ, мощностью  $2 \times 80$  кВт; обрабатывается объем газов  $(1.6-3.2) \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- Германия, Карлсруэ; 2 ускорителя с энергией 0.3 МэВ, мощностью  $2 \times 90$  кВт; обрабатывается  $(1-2) \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

В Германии действует передвижная установка с ускорителем электронов с энергией 0.15–0.3 МэВ для удаления вредных летучих органических соединений из газов промышленных предприятий и оксидов азота и бензола из газов автомобильных тоннелей.

Другим потенциальным применением является удаление вредных примесей (летучих органических соединений и полициклических ароматических углеводородов), которые являются продуктами сжигания отходов. Недавно проведенные исследования также продемонстрировали возможности применения этой технологии для удаления ртути из угольных котлов.

Ускорители электронов используются для очистки выбросных газов тепловых электростанций, работающих на каменном угле и мазуте.

Для удовлетворения растущего мирового спроса на энергию прогнозируется увеличение использования угля на 50% к 2030 г. Помимо проблем, связанных с выбросами углекислого газа, при сжигании угля образуется большое количество загрязняющих веществ, являющихся причиной кислотных дождей и смога, а также ртутного загрязнения природных вод, включая мировые океаны.

**Очистка воды.** В качестве источников ионизирующего излучения в установках для обработки воды, сточных вод и осадков используются ускорители электронов и радиоактивные источники  $\gamma$ -излучения, из которых чаще используются изотопы  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{154}\text{Eu}$ .

Очистка воды<sup>105</sup> включает в себя как очистку природной воды (из рек, озер, водохранилищ и т. д.), так и радиационную обработку сточных вод (бытовых канализационных стоков, после процесса промышленного или сельскохозяйственного производства и т. д.). Как показывает практика, традиционные процессы не полностью очищают воду от химических веществ.

Радиационная обработка воды путем облучения пучками электронов оказывается эффективней, чем химическая обработка, как при очистке воды

<sup>105</sup> Природная вода из водохранилищ, артезианских скважин, рек может быть заражена вредными микроорганизмами, хотя их содержание в воде обычно невелико.

для ее употребления, так и при очистке сточных вод, обработке воды для повторного использования, получении сверхчистой воды для производства.

Преимущества при радиационной обработке воды ускорителями электронов заключаются в следующем: низкий уровень затрат (поглощенная доза в режиме дезинфекции составляет 0.3–0.5 кДж/кг); высокие скорости процесса обработки; небольшие производственные площади; возможность полной автоматизации процесса; простота включения в технологическую цепочку обычных очистных сооружений.

Наличие в ней твердых частиц не препятствует разрушению химических примесей. Растворы, содержащие высокую адсорбцию соединений, не снижают эффективность процесса очищения, который к тому же не требует введения каких-либо химических веществ. Недавно возникшая проблема — сброс в воду отходов с наночастицами. Они загрязняют мембраны, используемые для очистки воды, использование которых широко распространено. Использование пучков электронов из ускорителей позволяет эффективно разрушать химические соединения при наличии в облучаемой среде наночастиц.

Если вода оказалась недостаточно очищенной, то дальше применяется биологическая очистка. Совмещение двух способов очистки минимизирует затраты на переработку.

Очистка природной воды, прежде всего предназначенной для снабжения населения, производится от вредных примесей и микроорганизмов, а также от токсичных и канцерогенных хлорсодержащих органических веществ, которые поступают из загрязненной окружающей среды и образуются при хлорировании воды.

При облучении воды из природных водоисточников с обычным загрязнением концентрация подобных примесей и уровень заражения обычно невелики, поэтому для получения питьевой воды требуется доза на уровне 2.5 кГр. С учетом, что в процессе облучения может быть устроено активное перемешивание воды, требуемую величину дозы можно установить на уровне 1–1.5 кГр. Поглощенная доза соответствует затратам энергии на очистку 1 м<sup>3</sup> воды, что сопоставимо с расходом энергии при озонировании. Одновременно облучение приводит к комплексной очистке воды, в том числе от высокотоксичных соединений.

Облучение загрязненной воды в таких дозах приводит к разложению микроорганизмов и вредных примесей, токсичных и канцерогенных хлорсодержащих органических веществ (дихлорэтана, трихлорэтана, трихлорэтилена, тетрахлорэтилена, хлорбензола и др.) при их содержании порядка 10<sup>-4</sup> моль/дм<sup>3</sup>. В результате радиационной обработки воды происходят следующие процессы: радиационное окисление, образование осадков органических веществ, коагуляция коллоидных растворов, обеззараживание, дегельминтизация, дезодорация и др. В результате радиационного окисления органические

вещества окисляются до оксида углерода. При этом происходит и процесс радиолиза. Поскольку при радиолизе, например, растворов хлорбензола возникают фенольные соединения, облучение часто сочетают с озонированием. Озонирование воды предохраняет облученную воду от повторного появления микроорганизмов и паразитов. Так, например, в США, с учетом среднего ежедневного потребления воды около 1000 л на человека, обработка половины всей потребляемой воды в городских системах потребует внедрения 500 ускорителей мощностью 500 кВт каждый.

Радиационная обработка используется для регенерации подземных вод, водных скважин, загрязненных продуктами биологических процессов.

Ионизирующее излучение убивает бактерии, осуществляющие окислительно-восстановительные реакции ионов, например Fe(II). Это уменьшает осаждение нерастворимых продуктов гидролиза и, следовательно, засорение водоотборников и «старение» скважин. Необходимые для этого дозы не превышают 0.25–0.4 кГр.

Радиационная обработка сточных вод<sup>106</sup> после их биологической очистки осуществляется при дозах от 0.4–0.5 кГр до нескольких кГр. Обычно такая вода используется для технических целей. В промышленных сточных водах имеется множество примесей, причем во многих случаях их концентрации существенно выше, чем в загрязненной природной воде. Для ее очистки требуются большие дозы (выше 10 кГр). Более того, для очистки применяют комбинированные методы. Одновременно с радиационной обработкой используют и обычные методы (химические, биологические, термические и т. д.).

Первая стадия очистки — отстаивание сточных вод. Здесь удаляются нерастворимые твердые частицы — до 8% массы осадка.

На второй стадии при биологической очистке возникают осадки — ил, значительную часть которого составляют микроорганизмы. Он после дезинфекции радиационными методами применяется как удобрение и добавки к кормам животных. Обязательность дезинфекции ила обусловлена тем, что в осадках содержится много вредных микроорганизмов, которые обеззараживаются при дозах 2–10 кГр.

На третьей стадии для очистки сточных вод используются линейные или высоковольтные ускорители (часто парами) на средние энергии до 0.7 МэВ мощностью в несколько десятков кВт. Сточная вода обычно распыляется и облучается в виде пены, плотность которой составляет 0.02–0.03 г/см<sup>3</sup>. Это увеличивает проникающую способность пучков электронов. Ее можно вычислить по эмпирической формуле

$$R(AI) = 0.542E_c - 0.133 \text{ [г/см}^2\text{]}, 0.8 < E_c < 3 \text{ МэВ}, \quad (3.1)$$

<sup>106</sup> Основные закономерности и возможности радиационной обработки природных и сточных вод различных производств (в основном под действием  $\gamma$ -излучения <sup>60</sup>Co) были разработаны и экспериментально проверены к началу 1970-х гг.

$$R(\text{Al}) = 0.530E_e - 0.106 \text{ [г/см}^2\text{]}, \quad 2.5 < E_e < 20 \text{ МэВ.} \quad (3.2)$$

Эффективный пробег электронов в веществе с зарядом  $Z$  и массовым числом  $A$  связан с эффективным пробегом в алюминии следующим образом:

$$R(A, Z) = R(\text{Al}) \frac{Z / A}{\text{Al}(Z / A)}. \quad (3.3)$$

Так, пробег электронов с энергией 4 МэВ в воздухе составляет 17.8 м, в воде — 2.2 см. При плотности  $0.02 \text{ г/см}^3$  пробег электронов будет в  $\sim 50$  раз больше и составит  $\sim 1.1$  м. Использование двух ускорителей, направленных навстречу друг другу, позволяет облучать потоки сточных вод шириной до  $\sim 2.5$  м. Такие установки работают в Канаде на основе источника  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  и в Польше на базе линейного ускорителя электронов с энергией 10 МэВ. Пробег электронов при этой энергии по формуле (3.3) составит примерно 5.6 см. Таким образом, два ускорителя, направленных навстречу друг другу, могут эффективно обрабатывать поток воды шириной 11.2 см, а при использовании одного такого ускорителя и распылении воды до плотности  $0.02 \text{ г/см}^3$  облучать можно поток шириной  $\sim 2.3$  м.

КПД ускорителей электронов, используемых в экологических целях, составляет порядка 80%, что является лучшим значением среди различных методов очистки воды. При этом сокращается использование электроэнергии.

Ускорители электронов также применяются для регенерации активированного угля, используемого для очистки природной и сточной воды. Необходимая для его регенерации доза велика и составляет 1 МГр. Такой метод регенерации активированного угля в 8–10 раз дешевле обычного высокотемпературного парового.

В нашей стране много промышленных ускорителей<sup>107</sup>, в том числе и для очистки воды, созданных СО РАН им. Будкера. В настоящее время институт производит ускорители трансформаторного типа с выпрямлением напряжения серии ЭЛВ с энергией 0.2–2.5 МэВ, мощностью пучка от 20–400 кВт, имеющих коэффициент полезного действия от розетки более 90%, высокочастотного типа серии ИЛУ с энергией 0.7–5 МэВ, мощностью от 10 до 50 кВт.

На рис. 3.10 приведена схема и внешний вид радиационной установки на базе ускорителей серии ИЛУ или ЭЛВ, разработанная в ИЯФ СО РАН.

Схема очистки сточной воды с помощью ускорителя электронов использовалась для восстановления загрязненной территории подземных вод города Воронежа. Работа по очистке осуществлялась с помощью трех промышленных ускорителей электронов, изготовленных в ИЯФ СО РАН и работавших с 1985 по 2000 г.

<sup>107</sup> Работы по созданию промышленных ускорителей электронов были начаты в ИЯФ по инициативе академика Г. И. Будкера в 1960-е гг. В настоящее время примерно из 1100 ускорителей с энергией (0.4–5) МэВ и мощностью (10–200 кВт), используемых сейчас в промышленности и технологических центрах всего мира, около 120 ускорителей произведено в ИЯФ СО РАН.

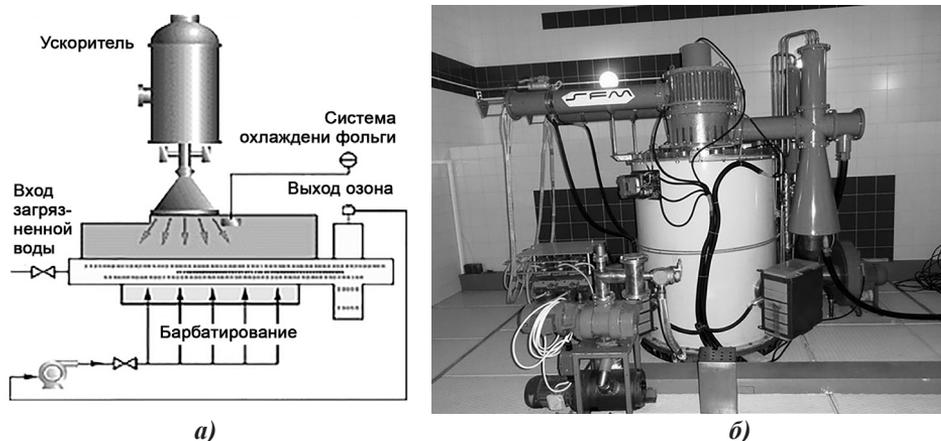


Рис. 3.10. Схема и внешний вид установки для очистки воды, разработанной в СО РАН

Кроме того, одновременно с использованием ускорителей распространена очистка радиоактивных сточных вод коагуляцией. Для очистки применяют обычные коагулянты:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{FeCl}_3$ . Перешедший в осадок (1–3% объема) свинец вывозят на пункты захоронения.

**Твердые отходы.** Ускорители могут использоваться и для обеззараживания твердых отходов больниц, аэропортов, очистки загрязненной почвы. В настоящее время для этих целей в основном используются источники  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$ . Такие установки действуют в США для обработки инфицированных больничных отходов.

Радиационные методы активно применяются для обеззараживания отходов больниц и аэропортов.

Технология радиационной обработки больничных отходов  $\gamma$ -излучением состоит из четырех стадий: разделение жидкой и твердой фаз, радиационная дезинфекция жидких отходов, радиационная дезинфекция твердых отходов и очистка выбросных газов. Другое перспективное применение  $\gamma$ -излучения — обработка отходов международных аэропортов, в которых ежедневно образуется до 20–30 т отходов. Радиационным методом осуществляется регенерация активированного угля с адсорбированным лаурилсульфатом натрия, который используется для очистки природной и сточной воды. Опытной радиационной обработке подвергались образцы угля. Доза, необходимая для регенерации, при облучении пучками электронов составила  $\sim 1$  МГр.

**Ядерные отходы.** Развитие мирового хозяйства требует все большего увеличения производства энергии. Кроме того, существует проблемы нехватки и истощения органического топлива. К тому же его использование приводит к росту загрязнения окружающей среды и значительному потреблению кислорода.

Атомная энергетика не требует потребления кислорода и при грамотной эксплуатации атомных электростанций имеет минимальное количество выбросов и отходов. Она позволяет обеспечить человечество электроэнергией на много веков.

Основной проблемой атомной энергетики является образование газообразных, жидких и твердых радиоактивных отходов с различной удельной активностью. Радиоактивное излучение от них представляет опасность для человека и окружающей среды. Радиоактивные элементы накапливаются в живых организмах и растительности, облучая их изнутри. Они проникают в почву и грунтовые воды, переносятся на большие расстояния воздухом и водой, увеличивая площадь радиоактивного заражения.

К твердым радиоактивным отходам относят загрязненные радионуклидами инструменты, приборы, материалы, изношенные детали и части оборудования, мусор, спецодежду, ветошь, отвержденные жидкие радиоактивные отходы и т. д. К жидким радиоактивным отходам относят технологические, дезактивационные и биологические стоки, остатки от упаривания малоактивных сточных вод, отработанные масла, различные органические растворители и др.

По степени активности твердые радиоактивные отходы делятся на три группы: слабоактивные с концентрацией  $\beta$ -излучающих радионуклидов до  $10^{-5}$  Ки/л; среднеактивные с концентрацией  $\beta$ -излучателей до 1 Ки/л; высокоактивные с концентрацией  $\beta$ -активных радиоактивных веществ свыше 1 Ки/л.

Радионуклиды  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  составляют более 85% активности в твердых радиоактивных отходах (ТРО). Их частичное удаление позволяет снизить активность отходов, и в результате остается масса ТРО с низкой активностью.

Жидкие радиоактивные отходы по степени радиоактивности, согласно рекомендаций МАГАТЭ, делятся на три категории: высокоактивные (с концентрацией  $10^{-4}$  Ки/л и выше); средней активности (от  $10^{-4}$  до  $10^{-8}$  Ки/л); слабоактивные ( $10^{-9}$  Ки/л и меньше). Жидкие высокоактивные радиоактивные отходы хранятся в металлических резервуарах. Радиоактивные отходы со средними уровнями активности перед удалением подвергаются дезактивации. Удаление слабоактивных радиоактивных отходов регламентируется санитарными правилами.

Твердые и жидкие радиоактивные отходы помещают в могильники — большие подземные емкости для захоронения твердых (а при необходимости — небольших количеств жидких) радиоактивных отходов, изолированные от грунтовых вод и атмосферных осадков. Их число и объем предусматривают с учетом заполнения в течение десятков лет. С учетом экономической целесообразности допускается предварительное прессование и сжигание радиоактивных отходов в специальных печах при соблюдении соответствующих санитарных требований, исключающих загрязнение окружающей среды и вредное облучение персонала. В случаях, когда это возможно, перед захоронением их

уплотняют. Могильники, как правило, размещают на территории атомных станций. В нашей стране на 2016 г. существовало 469 могильников в 221 пункте хранения радиоактивных отходов.

Разрабатываются и проходят опытную проверку технологии по выработке энергии из отработанного ядерного топлива с использованием пучков ускорителей. Кроме того, облучение ядерных отходов приводит к тому, что ряд радиоактивных изотопов становится стабильным.

Основными требованиями таких ускорительных систем как для выработки энергии, так и для трансмутации отходов являются: полная мощность пучка в 10–30 МВт, получаемая за счет энергии пучка в 1 ГэВ или выше; возможность варьирования интенсивности в зависимости от различных факторов; потери внутри ускорителя должны составлять не более чем 1 Вт на метр; очень высокая надежность — менее 25–50 незапланированных минутных перерывов в год; эффективность ускорителя более 25%; доступность. Стоимость инфраструктуры и самого ускорителя должна составлять менее 30% от общей стоимости системы.

# Глава 4

## Радиационные технологии в медицине

В современной онкологии лучевая терапия на ускорителях заряженных частиц и диагностика с использованием радионуклидов стали неотъемлемой составляющей лечения онкологических заболеваний наряду с хирургией и химиотерапией. Общий объем мирового рынка ядерно-физических технологий в медицине в 2014 г. составил \$16.3 млрд. По прогнозам, к 2020 г. он вырастет до \$24 млрд, а к 2030 г. может достичь \$43 млрд. Крупнейшие компании на этом рынке: General Electric, Siemens, Philips, Toshiba, Lantheus. Объем рынка в нашей стране в 2014 г. составил \$0.6 млрд. Предполагается, что к 2030 г. отечественный рынок может вырасти более чем в шесть раз.

### 4.1. Ускорители электронов в лучевой терапии

Структура лучевой терапии в современной медицине достаточно разветвленная. Она представлена на рис. 4.1. Видно, что она делится на два основных направления: дистанционную и контактную лучевую терапию.

Дистанционная лучевая терапия<sup>108</sup> проводится на пучках фотонов, электронов, протонов, нейтронов и ионов. Более 97% установок — ускорители электронов с энергией 4–25 МэВ. Ускорителей протонов и ионов в общем числе медицинских ускорителей < 1%. Энергия пучков протонов состав-

<sup>108</sup> С начала XX в. и до середины 1950-х гг. для дистанционной лучевой терапии применялось низкоэнергетическое излучение рентгеновских трубок и  $\gamma$ -излучение радиоактивных изотопов. Установка образцов была не автоматизирована, настройки производились вручную, энергия рентгеновского излучения была мала для эффективного облучения глубоко лежащих опухолей. Интенсивность природных источников радиационного излучения (радия, урана) была относительно низка. Только после открытия деления урана и создания атомных реакторов после Второй мировой войны удалось получить большое количество различных изотопов, обеспечивающих высокую интенсивность  $\gamma$ -излучения.



Рис. 4.1. Структура ядерно-физических технологий, действующих в медицине

ляет 70–250 МэВ. Пучки протонов получают на циклотронах и в меньшей степени — на синхротронах и фазотронах. Установки на пучках нейтронов в основном экспериментальные.

На ускорителях электронов лучевую терапию проводят в основном (более чем в 95% случаев) на пучках тормозного излучения, которые возникают при торможении электронов в мишени, существенно реже — непосредственно на пучках электронов.

Ускорители электронов стали основой для развития новых направлений лучевой терапии: стереотаксической хирургии (кибер-ножи), интраоперационной терапии и томотерапии.

Как видно из рис. 4.1, кроме ускорителей широко в дистанционной лучевой терапии применяются установки на изотопах  $^{60}\text{Co}$  (кобальтовые установки) и установки стереотаксической хирургии (гамма-ножи).

Ко второй ветви лучевой терапии — контактной — относят брахитерапию и интраоперационную лучевую терапию. В настоящем пособии мы ограничимся рассмотрением установок, базирующихся на ускорителях.

Медицинские ускорители электронов используются в 117 странах мира, по данным МАГАТЭ, их 11 250. Кроме того, в стереотаксической хирургии на базе ускорителей электронов действует ~550 кибер-ножей, 300 установок томотерапии и 100 установок для интраоперационной лучевой терапии. Помимо этого работает около 100 ускорителей протонов и ионов (циклотронов и синхротронов). Если к ним добавить еще 1500 циклотронов, производящих

Медицинские ускорители в ведущих странах мира

Страна	Население страны, млн чел.	Кол-во ускорителей, шт.	Население на один ускоритель, тыс. жителей	Кол-во медиц. физиков
США	310.2	3712	83.6	9345
Китай	1400	1086	1289.1	2994
Япония	127.3	872	146.0	2213
Германия	81.8	523	156.4	1318
Франция	65.4	504	129.8	1261
Италия	61.4	452	135.8	1135
Великобритания	62	344	180.2	863
Бразилия	193.4	292	662.3	761
Канада	34.2	282	121.3	710
Испания	46	274	167.9	687
Индия	1187.5	271	4381.9	852
Турция	72.5	249	291.2	631
Австралия	22.4	220	101.8	551
Россия	143.3	204	702.5	630
Нидерланды	16.6	152	109.2	380
Респуб. Корея	49.7	151	329.1	382
Польша	38.2	126	303.2	315
Иран	72.5	117	619.7	297
Мексика	108.3	113	958.4	299
<b>Всего</b>		<b>~9944</b>		<b>~25620</b>

радионуклиды для лучевой диагностики, то получится, что в медицине работает не менее 13 800 ускорителей. В таблице 4.1 представлена информация о распределении ускорителей в странах, использующих в медицине более 100 единиц ускорителей. Среди них Россия занимает 13-е место. Как видим из таблицы, в 13 ведущих странах мира работает около 9000 медицинских ускорителей. В Европе один ускоритель приходится на 150–200 тыс. жителей, в США — на 80 тыс. жителей.

Количество медицинских ускорителей за десять лет выросло почти на 7000 единиц — по сравнению с 2000 г. (5200 единиц). Они, как правило, заменяют кобальтовые установки<sup>109</sup>. Количество кобальтовых установок в лу-

<sup>109</sup> Первый аппарат для лучевой терапии с источником <sup>60</sup>Со под названием «Eldorado A» был запущен в 1951 г. в Канаде фирмой, имеющей современное название MDS Nordion, которая и сейчас является ведущим поставщиком гамма-терапевтических аппаратов. В 1953 г. в США был выпущен первый такой же аппарат, который имел почти все элементы современных

чевой терапии в конце XX в. в мире достигало почти 15 000 единиц, а с начала XXI в. уменьшилось почти в 7 раз и составляет примерно 2300 единиц.

Всего действует, строится и планируется 86 ускорителей протонов<sup>110</sup> и ионов. Ускорителей протонов строится 25 и 11 находятся в стадии разработки. Также строится 2 ускорителя ионов. В 19 странах мира действует 41 ускоритель протонов и 7 ускорителей ионов.

С конца 1950-х годов в медицине расширяется использование адронной лучевой терапии на пучках протонов и легких ионов. Количество ускорителей протонов и ионов, действующих, строящихся и планируемых, приближается к сотне. Пока рано говорить об их решающей роли в лучевой терапии, но в будущем они точно займут существенное место в лечении онкологических заболеваний. Одной из важнейших задач для этого является уменьшение размеров ускорителей и, соответственно, снижение их цены.

#### *4.1.1. Медицинские ускорители электронов*

Использование ускорителей в медицине преследовало несколько целей. Во-первых, это позволило повысить энергию и интенсивность пучка электронов. Ткани можно облучать как электронами, так и тормозными фотонами. Во-вторых, в отличие от радиоактивных источников, их можно выключить, и радиации не будет. В настоящее время одна из важнейших задач физиков — создание компактных ускорителей, желательна с легкой перестройкой энергии пучка.

Развитие ускорителей электронов в дистанционной лучевой терапии начиналось с высоковольтных ускорителей и бетатронов. Позднее появились циклотроны и линейные резонансные ускорители.

**Высоковольтные ускорители и бетатроны.** Первые ускорители были построены в конце 1920-х — начале 1930-х гг.<sup>111</sup> Схемы ускорителей основывались на использовании законов электростатики — рост энергии частицы

---

кобальтовых установок. В 1960-е гг. в Советском Союзе была выпущена большая серия кобальтовых аппаратов типа «Рокус» и «Агат». В 1950–1960-е гг. кобальтовые установки составляли конкуренцию ускорителям. Они имели сравнимую с ускорителями интенсивность и энергию фотонов, но меньшие габариты. Однако в последние десятилетия они вытесняются линейными ускорителями.

<sup>110</sup> Первым циклотроном, предназначенным специально для медицины, принято считать ускоритель, который начал сооружаться в клинике университета Вашингтона в Сент-Луисе в 1940 г.

<sup>111</sup> Одним из первых ускорителей был каскадный генератор, разработанный в Швейцарии Грейнахером в 1920 г. Такой же ускоритель был создан английскими физиками Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном из лаборатории Резерфорда в 1929 г. В 1932 г. они осуществили первую ядерную реакцию на созданном ими ускорителе: искусственно ускоренными частицами — протонами с энергией 700 кэВ — было расщеплено ядро лития на две  $\alpha$ -частицы. Эту дату можно считать началом истории ускорителей.

достигается путем увеличения энергии в постоянном электрическом поле, которое осуществляет ускорение. В этом случае энергия  $W$  заряженной частицы с зарядом  $q$  составляет

$$W = qU, \quad (4.1)$$

где  $U$  — разность потенциалов между высоковольтными электродами ускорителя.

На этих законах физики работают ускорители, получившие название высоковольтных. К ним относятся высоковольтные трансформаторы, каскадные ускорители, электростатический генератор Ван де Граафа. Отличаются они способом получения высокого напряжения и тем, какое напряжение используется между электродами — постоянное или переменное.

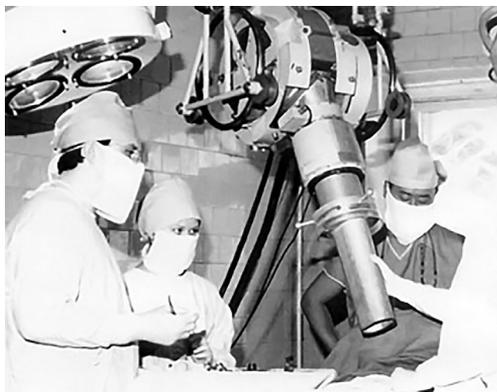


Рис. 4.2. Медицинский бетатрон МИБ-6Э

Однако процесс увеличения напряжения имеет пределы — между электродами возникает пробой. При очень высоких электрических полях диэлектрик становится проводником электричества. Поэтому высоковольтные ускорители имеют энергию, как правило, не более нескольких МэВ.

Высоковольтные ускорители в медицине широко использовались в лучевой терапии в значительной части XX в<sup>112</sup>. Они и в настоящее время используются в ядерной медицине для получения радиоактивных изотопов, которые применяются в диагностике во многих областях медицины, например в онкологии, кардиологии.

Другими ускорителями, которые стали применять в медицине, являются бетатроны. Они работают на другом принципе, используя закон Фарадея:

$$\varepsilon = -\frac{\partial\Phi}{\partial t}, \quad (4.2)$$

<sup>112</sup> Впервые ускоритель для лечения онкологических больных был применен в 1937 г. в госпитале St. Bartholomew's Hospital в Лондоне. Использовались тормозные фотоны с энергией 1 МэВ, которые получали при ускорении электронов в тандемном высоковольтном ускорителе (каждая половина имела напряжение 500 кВ). Размеры ускорителя достигали 10 м. Несколько позднее, в 1940-е гг., в США и Канаде в лучевой терапии стали использовать высоковольтные ускорители трансформаторного типа и ускорители Ван де Граафа с максимальной энергией тормозных фотонов до 1–4 МэВ, а также бетатроны с энергией до 13–25 МэВ.

где  $\Phi$  — магнитный поток  $\Phi = \int \mathbf{B} \, dS \approx \langle \mathbf{B} \rangle \pi R^2$ ,  $\varepsilon$  — ЭДС индукции на замкнутом контуре. В них происходит ускорение вихревым электрическим полем в течение четверти периода колебания. На рис. 4.2 представлен компактный медицинский бетатрон МИБ-6Э с энергией 6 МэВ, созданный в Томском политехническом институте. Бетатроны широко применяются в дистанционной и интраоперационной лучевой терапии.

**Резонансные линейные ускорители электронов.** Следующий виток развития ускорительной техники связан с созданием резонансных ускорителей<sup>113</sup>. Смысл их заключается в том, чтобы частицы периодически подталкивать электрическим полем, как мы подталкиваем качели, чтобы они не остановились.

К таким ускорителям относятся линейные резонансные ускорители<sup>114</sup> — наиболее распространенный тип линейных ускорителей, особенно до энергии 10–25 МэВ.

Они отличаются от высоковольтных ускорителей тем, что конечная энергия частицы много больше приложенного напряжения, умноженного на заряд (4.1) и число ускоряющих секций. Электрическое поле, используемое в резонансных ускорителях, в отличие от высоковольтных ускорителей, всегда переменное. Современные медицинские резонансные ускорители используют диафрагмированный волновод (рис. 4.3, *a*), в котором движение электромагнитной волны описывается уравнением:

$$E_+ = E_0 \sin \left( \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \right), \quad (4.3)$$

или

$$E = E_+ + E_- = E_0 \sin \left( \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \right) + E_0 \sin \left( \omega \left( t + \frac{x}{c} \right) \right). \quad (4.4)$$

Такие ускорители называют ускорителями на бегущей или стоячей волне соответственно. Блок-схема медицинского линейного резонансного ускорителя представлена на рис. 4.3, *a*. Из источника электронов (электронной пушки) испускается интенсивный низкоэнергетический пучок электронов. Пучок

<sup>113</sup> Первые идеи об использовании резонансного подхода к ускорению частиц были высказаны в 1924 г. шведским физиком Изингом. Резонансный принцип ускорения был также предложен Видероз для линейных ускорителей, а в 1928 г. им был построен первый линейный ускоритель. С целью уменьшения размеров ускорителя в 1929 г. Лоуренс предложил модель кольцевого резонансного ускорителя — циклотрона.

<sup>114</sup> После создания в 1937 г. братьями Вариан (Russell and Sigurd Varian) клистрона в начале 1950-х гг. в Стэнфордском университете Г. Каплан и Э. Гинзтон использовали идеи линейного ускорителя на основе клистрона для создания медицинского линейного ускорителя. В 1953 г. был разработан и построен первый промышленный медицинский линейный ускоритель Metropolitan-Vickers (Met-Vic).

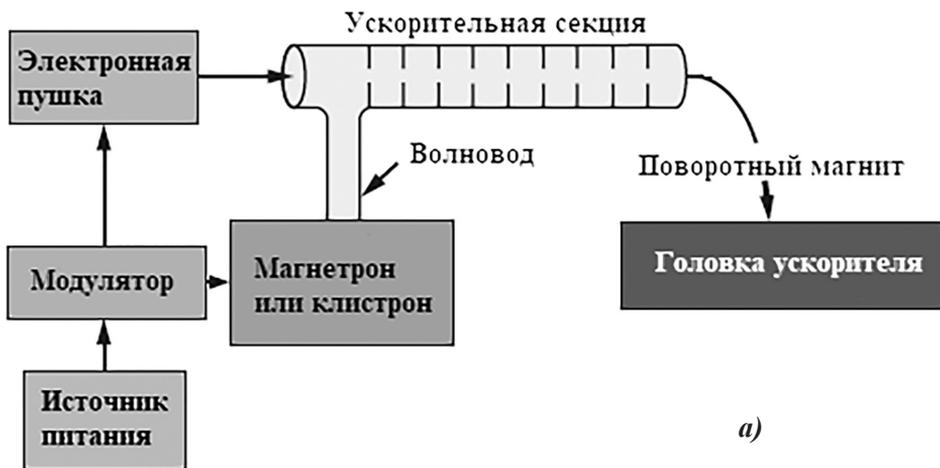


Рис. 4.3: а) схема ускорителя на бегущей волне; б) общий вид медицинского ускорителя



**Рис. 4.4.** Ускоряющая секция на энергию 4 МэВ и клистрон на частоту 5712 МГц производства НПП «Торий»

модулируется в сгустки модулятором, который питается от источника высокого напряжения. Модулятор модулирует электромагнитную волну, которая через волновод попадает в ускорительную секцию.

Ускорительная секция на рис. 4.3, *а* для ускорителя на бегущей волне представляет собой диафрагмированный волновод, внутри которого располагаются диафрагмы с отверстиями разного диаметра. Наличие диафрагм позволяет изменять фазовую скорость электромагнитной волны и удерживать частицы в одной фазе с волной. Для того чтобы происходило ускорение на бегущей волне, частица должна находиться с ней в одной фазе. Именно с этой целью модулируют электромагнитную волну и пучок электронов. В ускоряющей секции пучок ускоряется до необходимой энергии. В диафрагмированный волновод по волноводам подаются СВЧ электромагнитные волны с частотой порядка 3 ГГц от клистрона или магнетрона (генераторов СВЧ-поля). Создание ускорителей на бегущей волне позволило существенно уменьшить размеры ускорителя. На рис. 4.3, *б* приводится общий вид медицинского линейного ускорителя электронов.

В ускоряющей секции электроны ускоряются обычно до энергий 4–25 МэВ. На рис. 4.4 в качестве примера представлена ускоряющая секция с клистроном предприятия «Торий».

Развитие медицинских ускорителей было направлено на уменьшение их размеров. Для создания таких компактных медицинских ускорителей в дальнейшем стали использовать стоячие волны.

Как видно из рис. 4.3, в отклоняющем магните пучок ускоренных электронов разворачивается на  $270^\circ$  и перпендикулярно направляется на тормозную мишень для формирования пучка тормозных фотонов. Мишень состоит из тяжелого материала, например вольфрама. При необходимости облучения непосредственно электронным пучком тормозная мишень убирается, и наружу выходит пучок электронов (рис. 4.5). Для формирования поля сложной формы в 1970-е гг. были созданы коллиматоры, которые позволяли формировать поля разной формы, близкой к форме облучаемого объекта.

Схема головки современного медицинского ускорителя представлена на рис. 4.5. В ней происходит поворот пучка электронов перпендикулярно первоначальному направлению движения. Далее пучок электронов сбрасывается на тормозную мишень (схема А) для создания пучка тормозных фотонов или выводится непосредственно из ускорителя (схема Б). После прохождения первого фильтра пучок фотонов или электронов падает на специальную заслонку — карусель.

Обе схемы отличаются положением карусели. В зависимости от ее положения работают то схема А, то схема Б. Для выравнивания пространственного распределения пучка в схеме А используется фильтр, сглаживающий распределение фотонов на плоскости, во втором — рассеивающая фольга, которая выравнивает распределение пучка электронов на плоскости. Как

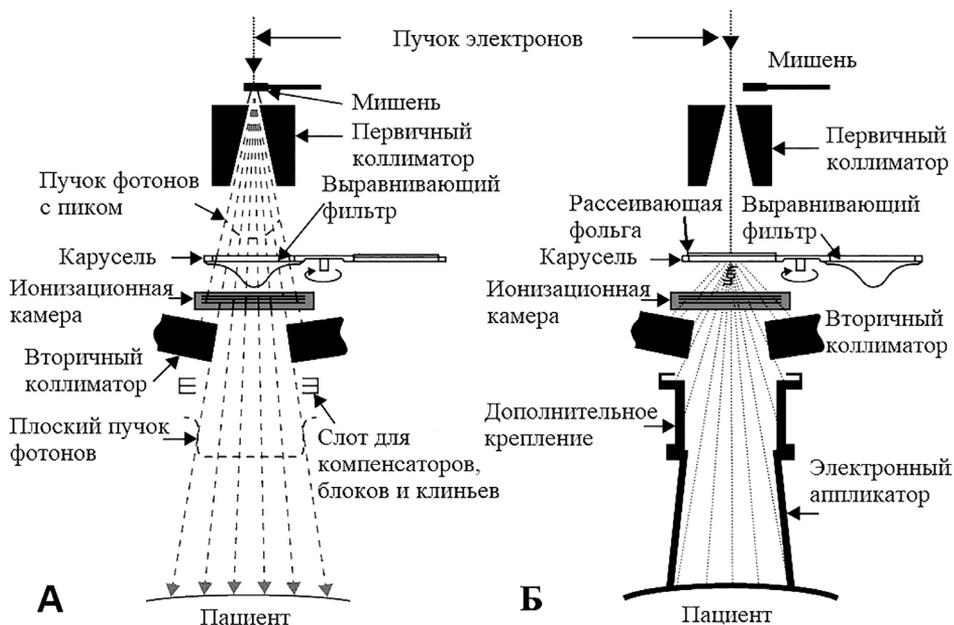


Рис. 4.5. Устройство облучающей головки ускорителя

видно из рис. 4.5, конечный пучок формируется первичным и вторичным коллиматорами.

Стремление физиков повысить качество лучевой терапии и решить важную для медицины задачу — обеспечение максимального совпадения контуров опухоли и формы пучка фотонов, т. е. придания объему высокой дозы формы опухоли при ограничении до минимума дозы на окружающие здоровые ткани, определило новое направление — *конформную лучевую терапию* (КЛТ). С клинической точки зрения, это «попытка обеспечить разрушение паталогического очага без переоблучения здоровых тканей».

При конформном радиационном воздействии для создания требуемой формы поля необходимы различные варианты фигурных блоков. Конформная лучевая терапия требует обязательного применения трехмерного планирования облучения. Дополнительное формирование пучка достигается использованием комбинации коллиматоров и специальных блоков. Блоки перекрывают части прямоугольного поля вне объема мишени и защищают здоровые ткани за границами мишени.

Дальнейшее повышение качества лучевой терапии связано с созданием многолепестковых коллиматоров (МЛК).

В 1980-е годы были разработаны специализированные системы коллиматоров с механизировано изменяемой формой — многолепестковые коллиматоры (multileaf collimator — МЛК). Они состоят из множества тонких пластин, плотно прилегающих друг к другу, сделанных из тяжелого металла (например, свинец, вольфрам). Поглощение фотонов в них пропорционально  $z^3$ . Каждая пластина независимо передвигается под управлением компьютера. Специальные компьютерные программы (системы планирования) с учетом локализации опухоли и здоровых органов формирует передвижения каждого лепестка в коллиматоре на основе заданий врача.

В результате формируется индивидуальный коллиматор, который обеспечивает оптимальное облучение каждого больного со всех направлений облучения. На рис. 4.6 представлены формы лепестков коллиматоров. Обычно в качестве МЛК применяются

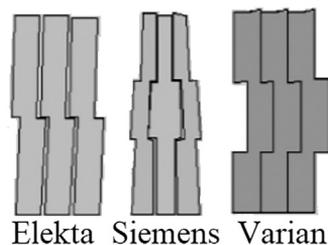


Рис. 4.6. Формы лепестков МЛК

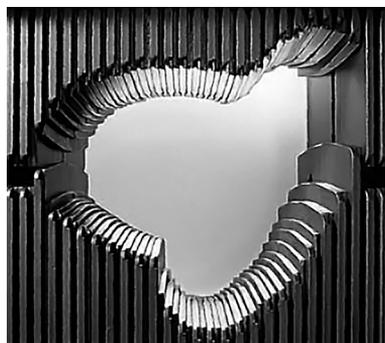


Рис. 4.7. Многолепестковый коллиматор. 54 лепестка формируют поле облучения, соответствующее очертаниям опухоли

так называемые язычки и пазы, по типу ключа (Varian, Siemens), либо лепестки располагаются под наклоном и имеют молниеобразную форму (Elekta).

Современные медицинские линейные ускорители оснащены многолепестковым коллиматором (МЛК), сформированным из 48–120 лепестков. С помощью системы планирования лучевого лечения из этих лепестков создаются поля облучения любой конфигурации. На рис. 4.7 представлен внешний вид такого многолепесткового коллиматора.

В настоящее время в комплект медицинского ускорителя обязательно входит многолепестковый коллиматор. Улучшению качества планирования лучевого лечения способствовало появление объемных томографических изображений с помощью компьютерных томографов (КТ) и магнитно-резонансных томографов (МРТ) десятилетия спустя.

Для реализации этой задачи стало развиваться прямое и инверсионное планирование лечения. При прямом методе планирования задается интенсивность и форма падающих пучков, а полученные дозы рассчитываются с помощью численных алгоритмов. Вручную или полуавтоматически подбирают такие характеристики пучков, при которых распределение дозовых полей будет максимально приближаться к заданному. При инверсном планировании задается желаемое распределение доз, а программный алгоритм самостоятельно (или с ограниченной помощью человека) находит оптимальные характеристики пучков. Инверсное планирование более удобно и эффективно, но сложнее с точки зрения математической реализации. Поэтому такие методы стали появляться позже, на современных компьютерах высокой мощности.

Для повышения точности совпадения томограмм и результатов планирования лечения появились системы лазерного и механического позиционирования. Стали использовать реперные точки для привязки томограмм к ускорителю. Таким образом, была достигнута точность реализации плана лечения выше 2 мм.

Кроме этого, дальнейшим развитием лучевой терапии стала лучевая терапия с модулированным по интенсивности пучком (Intensity-Modulated Radiation Therapy). Ее преимущество по сравнению с конформной лучевой терапией — варьирование интенсивности пучков с разных направлений в процессе облучения.

Однако в процессе облучения происходят естественные неконтролируемые движения внутренних органов человека, а следовательно, и опухоли. Для учета этих движений последние годы развивается еще одно направление дистанционной лучевой терапии — лучевая терапия под визуальным контролем (image guided radiotherapy — IGRT).

Таким образом, современный медицинский ускоритель — это не просто ускоритель, а целая система, включающая в себя системы диагностики

и планирования лечения, системы позиционирования, системы коллиматоров и другие. Физика действия пучка на раковую клетку везде одинакова. Главная задача, решаемая физиками и математиками, — точность попадания в опухоль и уменьшение числа таких попаданий в здоровые клетки.

Следующие разделы будут посвящены ускорителям электронов, лежащих в основе самых современных высокотехнологичных методов, — томотерапии, интраоперационной лучевой терапии и кибер-ножа.

К подобным установкам относятся медицинские ускорители протонов и ионов, которые остаются пока редкими, можно сказать, экзотическими установками. Но за ними большое будущее в медицине XXI и последующих веков.

#### *4.1.2. Ускорители в стереотаксической хирургии*

Стереотаксическая (иногда говорят стереотактическая) хирургия<sup>115</sup> — это высокопрецизионное облучение очагов поражения. В настоящее время в этом методе существует два варианта распределения дозы во времени. Однократное подведение высоких доз к небольшим (обычно до 3 см в максимальном размере) патологическим образованиям называют радиохирургией. Радиотерапией называют фракционирование дозы во времени (в этом случае могут облучаться очаги большего размера). Стереотаксическая радиохирurgia — это метод передачи высокой дозы лучевой терапии в однократной фракции с использованием множества пучков, направленных в одну точку. Таким образом, стереотаксическая радиохирurgia (СРХ) есть методика трехмерной доставки дозы в лучевой терапии путем передачи высокой дозы в однократной фракции с использованием множества некомпланарных пучков.

В радиохирургии к источникам ионизирующих излучений предъявляются следующие требования: возможность поставки очень высокой дозы радиации (обычно за одну фракцию) и наличие сверхточной системы доставки дозы; возможность создания крутого градиента спада дозы для обеспечения минимального воздействия на окружающие ткани; использование компьютеризированных систем дозиметрического планирования.

В стереотаксическом лечении используется два основных типа ионизирующего излучения: фотонные пучки и протонные пучки.

В настоящее время в медицине используются установки стереотаксической<sup>116</sup> хирургии на пучках фотонов с множественными источниками — Leksell

<sup>115</sup> Термин «стереотаксическая хирургия» означает выжигание опухоли пучком частиц без хирургического вмешательства.

<sup>116</sup> Исторически первое такое устройство было создано на основе линейного ускорителя Radionics X-Knife. В этой системе использовали множество дуг с обычным ускорителем для лучевой терапии. Ускоритель вращался вокруг неподвижного изоцентра. В изоцентре формировался пучок диаметром 10×12 см.

Gamma Knife и Gamma Art 6000, а также с одиночными источниками — системы с линейными ускорителями Axesse, Cyberknife, МНИ-ТМ 2000, Novalis (Tx), Oncor Artiste, Synergy S, Tomotherapy Hi-Art, Trilogy, Omni Beam, Primaton.

Первой установкой стереотаксической<sup>117</sup> хирургии стал гамма-нож, позволяющий подводить множество пучков  $\gamma$ -излучения от источников  $^{60}\text{Co}$  в небольшой объем мишени. Доза в нем возрастает многократно по сравнению с окружающими облучаемый объем тканями. В первой модели гамма-ножа Л. Лекселл использовал 179 источников  $^{60}\text{Co}$ , а в следующей — 201. Они располагались на поверхности полусферы (шлема), как показано на рис. 4.8. Тонкие радиоактивные пучки фотонов в гамма-ноже прецизионно направляются в одну точку. Совокупность источников ионизирующего излучения обеспечивает мощность дозы в облучаемом объеме порядка 300 сГр/мин. Накапливаемая в нем доза почти на порядок превышает дозу на поверхности тела человека. При подводимой к опухоли дозе до 10 Гр она погибает. В 1968 г. в Стокгольме впервые провели операцию на гамма-ноже. Один из недостатков установки — радиационная опасность и в выключенном состоянии, а также необходимость замены источников через некоторое время (5–10 лет). Такие проблемы отсутствуют, если вместо кобальтовых источников использовать ускорители. Эта же идея лежит и в основе стереотаксической установки на пучках фотонов или протонов из ускорителя.



**Рис. 4.8.** Схематическое изображение действия установки гамма-нож

**Кибер-нож.** Одной из наиболее совершенных установок стереотаксической радиохирургии<sup>118</sup> является кибер-нож<sup>119</sup>. Его основа — все тот же ускоритель электронов. При использовании в лучевой терапии кибер-ножа удается наиболее эффективно передавать дозу пучка фотонов облучаемому паталогическому очагу.

<sup>117</sup> В 1940-х гг. возникли идеи онкологических операций, в которых роль скальпеля должны были осуществлять  $\gamma$ -лучи, испускаемые радиоактивными источниками. В 1948 г. шведский нейрохирург Л. Лекселл предложил использовать стереотаксическую рамку и радиоактивные источники  $^{60}\text{Co}$  для проведения высокоточных нейрохирургических онкологических операций.

<sup>118</sup> Стереотаксическая радиохирургия (СРХ) — это метод передачи высокой дозы в лучевой терапии в однократной фракции с использованием множества пучков, направленных в одну точку.

<sup>119</sup> Система кибер-нож была создана в 1992 г. в Стенфордском университете под руководством Д. Адлера. В 2012 г. в мире действовало около 300 таких установок, из них большая часть в США и Японии. В России их четыре и еще несколько устанавливается.

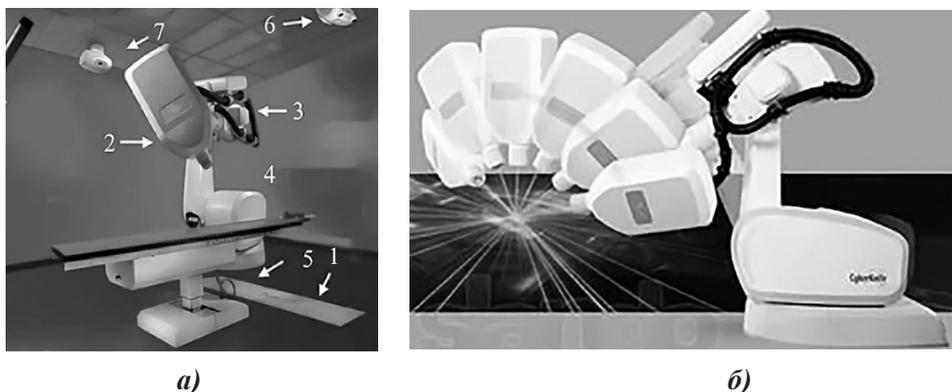
Распределение дозы в облучаемой мишени соответствует требованиям радиохирургии: возможность доставки очень высокой дозы (обычно за одну фракцию); наличие крутого спада (градиента) дозы, необходимого для обеспечения минимального воздействия на окружающие ткани; высокая точность попадания пучка в заданную область мишени; использование компьютеризированных систем дозиметрического планирования; наличие сверхточной системы доставки дозы.

Кибер-нож содержит два основных элемента: легкий линейный ускоритель и мобильную контролируруемую компьютером роботизированную руку, имеющую шесть степеней свободы. Это позволяет обеспечить доставку пучка фотонов к сотне локаций в теле пациента, причем с 1200 направлений к каждой локации. Энергия используемого в кибер-ноже линейного ускорителя составляет 4–6 МэВ, его масса ~120 кг. Тормозное излучение генерируется на вольфрам-медной мишени. Точность попадания пучка в мишень достигает 0.5 мм. Мощность дозы 4 Гр/мин. Пример такой системы и основные элементы представлены на рис. 4.9, *а*. Принцип действия кибер-ножа на пораженный очаг представлен на рис. 4.9, *б*.

При использовании кибер-ножа юстировка пациента осуществляется с помощью двух ортогональных рентгеновских трубок (элементы 6, 7 на рис. 4.9, *а*) с энергией 2 кэВ и расположенных за ним флуоресцентных экранов. Точность расположения пациента составляет 0.95 мм. Для создания узких пучков фотонов используются цилиндрические коллиматоры от 5 до 60 мм в диаметре.

Процесс стереотаксической радиотерапии осуществляется двумя этапами: планирование лечения и система доставки. Сначала получают диагностическую информацию с помощью магнито-резонансной томографии, компьютерной томографии и ангиографии. На следующем этапе выполняется позиционирование пациента на лечебном устройстве. Затем создается план лечения, т. е. медицинскими физиками выбирается число и направления сеансов облучения, энергия пучка тормозных фотонов, а также форма и размер пучков. После определения положения опухоли и метастазов, разработки плана лечения каждый из объектов с высокой точностью облучается с многих направлений в одном сеансе. Это оказывается возможным благодаря размещению легкого ускорителя (элемент 2 на рис. 4.9, *а*) на манипуляторе (3 на рис. 4.9, *а*) и роботизированной системе подводки пучка (4 на рис. 4.9, *а*).

Автоматизированная рука имеет 6 степеней свободы и способна обеспечить доставку пучка к сотне локаций в теле пациента с 12 направлениями к каждой локации. Кибер-нож позволяет в одном сеансе облучать опухоль и множество метастаз. Таким образом, он позволяет устранить большое количество локализаций в теле человека. Эффект от использования данной установки оказался настолько ощутим, что за последнее десятилетие число



**Рис. 4.9.** а) Система кибер-нож включает в себя: 1 — камеру Synchrony, 2 — линейный ускоритель, 3 — манипулятор, 4 — роботизированную систему подводки пучка, 5 — детекторы изображения, 6, 7 — рентгеновскую систему нацеливания; б) принцип действия кибер-ножа

используемых в лучевой терапии установок класса кибер-нож выросло почти на порядок.

Производитель Gamma Knife шведская фирма Elekta<sup>120</sup> выпустила первую трехмерную систему для лучевой терапии, основанную на изображениях с компьютерного томографа. В этой системе устройства доставки дозы и получения изображений интегрированы в единую систему. Система портальных снимков позволяет непрерывно отслеживать и изменять положение пациента в процессе лечения.

В настоящее время в медицинских центрах мира функционируют около 330 гамма-ножей и 300 кибер-ножей. Больше половины установок приходится на США и Японию. За последние 3–4 года медицинскими центрами России были приобретены 5 установок для радиохирургии (всего их стало 11), что позволило нашей стране по общему количеству таких установок занять 10 место. Лечение на стереотаксических комплексах в мире получили более 40 тыс. пациентов, значительная часть которых считалась безнадежными. Курс лечения составлял около одного часа. После одного или нескольких сеансов состояние больных улучшалось, а через некоторое время многие больные возвращались к нормальной жизни.

К основным преимуществам установки следует отнести: высокую точность попадания пучка в мишень; наличие системы мониторинга положения пациента и его движения с коррекцией облучения; высокую надежность роботизированной руки (подобные устройства широко применяются в производстве).

<sup>120</sup> Производитель Gamma Knife.



а)



б)

**Рис. 4.10.** Внешний вид ускорителей Senergy (а) и Trilogy (б)

К недостаткам можно отнести высокую стоимость лечения (на установке можно пролечить 2–4 пациента в день) и достаточно частое возникновение неисправностей.

**Линейные ускорители.** В стереотаксической хирургии применяются и медицинские линейные ускорители. Приведем пример использования ускорителей Senergy и Trilogy, представленных на рис. 4.10.

Фирма Elekta выпустила трехмерную систему лучевого планирования, основанную на изображениях с компьютерного томографа. В этой системе ускоритель Senergy и КТ представляют собой единый комплекс. В этом случае в процессе облучения непрерывно отслеживается и изменяется положение пациента.

Система Trilogy, разработанная фирмой Varian, позволяет использовать однократную или фракционированную по дозе и модулированную по интенсивности трехмерную конформную стереотаксическую лучевую терапию. Ускоритель Trilogy позволяет использовать до шести наборов энергий электронов от 4 до 22 МэВ и две энергии фотонов 2 или 20 МэВ. Основные компоненты системы: ускоритель Trilogy, лечебная кушетка, многолепестковый коллиматор, программное обеспечение для динамической коллимации, система согласования с дыханием пациента, лазерная система наведения, интегрированная консоль управления; встроенная система позиционирования и определения объема мишени; конические коллиматоры для дуговой терапии, стереотаксическая рамка для интракраниальных заболеваний, оптическая система позиционирования для СРХ. Отличительная особенность данной системы — высокая мощность дозы (до 600 сГр/мин на расстоянии 100 см от источника).

Кроме упомянутых систем в стереотаксической радиохирургии действует система Brain Lab Novalis, совместная разработка Varian и Brain Lab, оснащенная многолепестковым коллиматором для достижения конформной модулированной по интенсивности лучевой терапии. Энергия фотонов

6 МэВ, размеры поля до 10 см<sup>2</sup>. Распределение установок стереотаксической хирургии гамма-нож и кибер-нож в ведущих странах мира на 2012 г. представлено в табл. 4.2.

К достоинствам систем, базирующихся на линейных ускорителях по сравнению с гамма-ножами, следует отнести отсутствие контакта с радиоактивными материалами и изменений мощности дозы, а к недостаткам — несколько худшую точность попадания пучка в мишень. Гамма-нож создает более однородное поле, чем линейные ускорители, вплоть до поперечных размеров порядка 3 мм.

**Таблица 4.2**

**Распределение гамма- и кибер-ножей в мире**

Страна или регион	Гамма-нож	Кибер-нож
США	117	153
Япония	52	29
Китай	20	21
Россия	5	9
Европа (исключая Россию)	37	54
Азия (исключая Китай и Японию)	51	48
Северная Америка (исключая США)	7	6
Южная Америка	12	5
Африка	3	—
Австралия	2	1
Всего	306	326

**Ускорители протонов.** Стереотаксическая хирургия осуществляется и на пучках протонов. Преимущество пучков протонов заключается в том, что доза облучения передается тканям в самом конце пробега протонов (в области пика Брэгга). Поэтому ткани, расположенные за пиком Брэгга, практически не облучаются. Возможность использования пучков протонов в стереотаксической хирургии обусловлена созданием гантри для ускорителей протонов, которые позволяют направлять пучки протонов на облучаемый патологический очаг с разных сторон, как это происходит при использовании гамма- и кибер-ножа. Их положительные особенности — слабое рассеивание пучков и высокая точность попадания в облучаемый объем тканей.

### *4.1.3. Интраоперационная лучевая терапия*

Это направление применения ускорителей электронов в медицине возникло в конце 1970-х гг. В США интраоперационную лучевую терапию начали проводить с 1976 г. Интраоперационная лучевая терапия (ИОЛТ) — особая

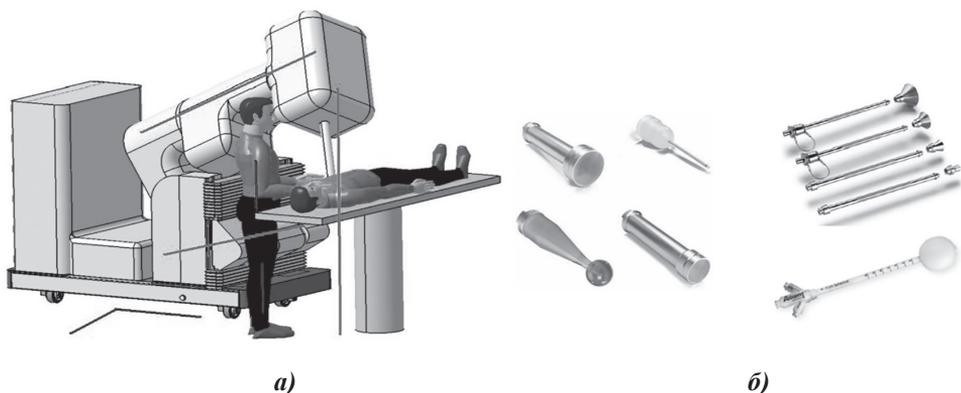
технология лучевого лечения онкологических больных, позволяющая однократно подвести высокую дозу пучков фотонов или электронов к заданной области. Она основана на облучении ложа глубинных злокачественных опухолей непосредственно после их удаления во время хирургической операции. Главная привлекательность этого метода состоит в том, что ионизирующее излучение может быть направлено непосредственно на патологический очаг, в то время как смежные нормальные ткани можно уберечь от облучения. Таким образом, облучению подвергаются микроскопические фрагменты опухоли, которые, возможно, остались в ее ложе.

Доступ к опухоли обеспечивается хирургическим путем, и облучается либо сама опухоль, либо ложе после ее удаления. В операционную рану пациента в стерильных условиях вставляют специальный пластиковый или металлический тубус, который соединяется другим концом с облучающей головкой. Тубус не только формирует поле облучения, но и экранирует от первичного излучения ткани и органы, находящиеся вне его. Для интраоперационной лучевой терапии используются малогабаритные линейные ускорители электронов с энергией несколько МэВ. Преимуществами данного метода являются возможность непосредственной визуализации облучаемого объема, отсутствие необходимости процедур трехмерного дозиметрического планирования, отсутствие паузы между окончанием операции и началом курса лучевой терапии (реабилитационный период), в течение которой возможен дальнейший рост опухолевых клеток, косметические преимущества (отсутствие лучевых реакций на коже и сопутствующих кожных заболеваний).

Пример такой установки приведен на рис. 4.11, *а*. Существует два типа аппаратов для интраоперационной лучевой терапии. Первые используют киловольтное рентгеновское излучение (Xoft, Intrabeam), а вторые — мегавольтные пучки электронов, получаемые на небольших ускорителях (Mobetron, Novac7).

При использовании низкоэнергетических фотонов в операционную рану пациента в стерильных условиях вставляют специальный пластиковый или металлический сферический аппликатор, который соединяют с источником. Аппликатор формирует поле облучения, поэтому важно правильно выбрать его объем. Аппликаторы аппарата Xoft имеют диаметр от 3 до 5 см, они заполняются водой, позволяя выбирать объем с шагом до 5 см<sup>3</sup>. У аппарата Intrabeam аппликаторы твердые и имеют строгий диаметр от 1 до 5 см. Кроме того, оба аппарата также позволяют проводить лучевую терапию при опухолях гинекологической направленности и поражениях кожи. Для этого также используются специальные аппликаторы, предназначенные для модификации пучка в процессе облучения. Они показаны на рис. 4.11, *б*.

Установки **IntraBeam**. Ортовольтные системы представляют собой миниатюрный источник фотонного излучения 30–50 кэВ с изотропным спектром.



**Рис. 4.11:** *а)* ускоритель для интраоперационной лучевой терапии;  
*б)* различные аппликаторы для Intrabeam (*слева*) и Xofig (*справа*)

Использование низкоэнергетических фотонных систем позволяет доставлять высокую дозу за один сеанс в сочетании с простотой радиационной защиты в процессе облучения. Для облучения вырезанного участка опухоли разработаны сферические аппликаторы различных диаметров (2–5 см). Спад дозы в случае отсутствия аппликаторов идет по закону  $\sim 1/r^3$ , где  $r$  — расстояние от наконечника трубки. Типичные значения дозы составляют 5 Гр на рассто-



**Рис. 4.12.** Установка IntraBeam в операционной

янии 1 см, 10 Гр — на глубине 0.5 см или 20 Гр на поверхности сферы при времени облучения 20–30 мин.

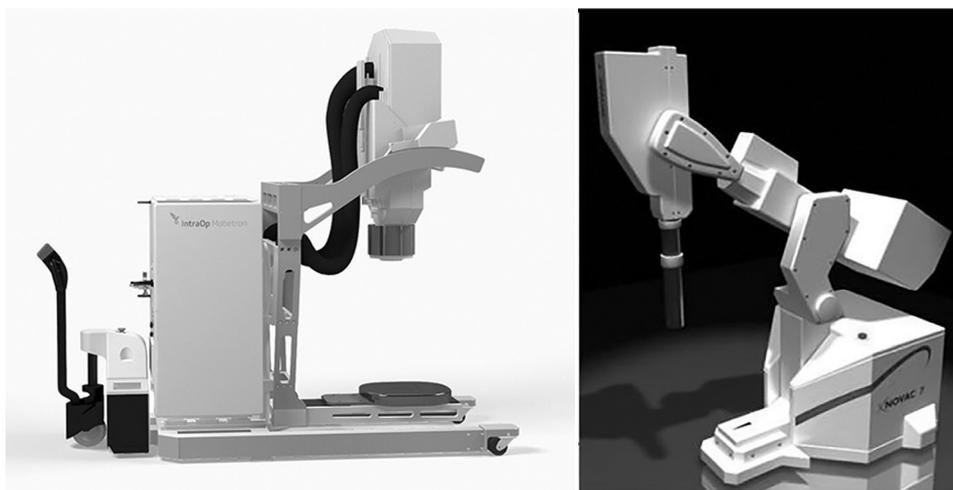
ИОЛТ осуществляется электронными пучками на стационарных ускорителях, предназначенных для дистанционной лучевой терапии. С этим, однако, связаны существенные ограничения. Во-первых, необходимость транспортировки стерильного пациента из операционной; во-вторых, ограниченные направления подведения излучения. Вместе с тем эффективность метода ИОЛТ была клинически доказана при лечении злокачественных новообразований молочной железы, мягких тканей, легких, пищевода и желудка, поджелудочной железы, гинекологических раков, колоректальных раков и других.

Эффективность метода ИОЛТ обусловлена в том числе возможностью применения электронных пучков с энергией 4–12 МэВ, позволяющих равномерно облучать мишени глубиной до 4–5 см. При этом по сравнению с фотонными пучками по достижении 80% изодозы наблюдается резкий спад дозы с последующей глубиной. Поэтому находящиеся под зоной облучения здоровые ткани практически не затрагиваются. Наиболее привлекательной ИОЛТ является для тех локализаций, для которых проведение традиционной дистанционной лучевой терапии невозможно. Например, при локализациях (рак желудка и поджелудочной железы) и саркомах мягких тканей.

За последние 6–8 лет недостатки ускорителей при проведении ИОЛТ были устранены с появлением компактных мобильных электронных ускорителей, располагающихся непосредственно в операционных. Сегодня данные установки производятся фирмами Intraop Medical Systems (США) и Sordina IORT Technologies SpA (Италия). Это, соответственно, Mobetron и Novac7. С их появлением частота использования ИОЛТ в мировой клинической практике существенно выросла. Ряд зарубежных исследований позволяет говорить о повышении качества ИОЛТ.

**Система Mobetron.** Данное устройство состоит из ускорителя на стоячей волне и «головки», смонтированных на С-образной «руке» (рис. 4.13, а), модулятора электропитания и панели управления. В корпус устройства вмонтированы системы радиационной защиты ускорителя. Максимальные размеры: 250 см в высоту, 290 см в длину, в положении для транспортировки С-образная рука складывается и полная высота составляет 190 см. Полный вес 1140 кг; при этом не требуется перестройки стандартной операционной. Mobetron может поставлять пучки электронов четырех различных энергий: 4, 6, 9 и 12 МэВ, с терапевтическим пробегом до 4 см. Система обеспечивает высокую (10–25 Гр) дозу за одну фракцию с мощностью дозы 10 Гр/мин.

**Система Novac7.** Система представляет собой миниатюрный линейный ускоритель электронов, расположенный на роботизированной руке с четырьмя вращающимися суставами, закрепленной на неподвижной основе. Она представлена на рис. 4.13, б. Ускоритель позволяет получать пучки электро-



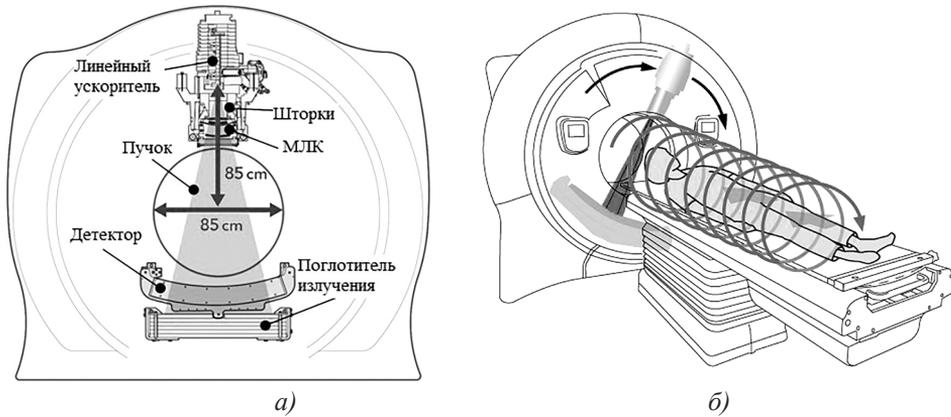
**Рис. 4.13.** Общий вид установок: *а) Mobetron; б) Novac7*

нов с энергиями 3, 5, 7 и 9 МэВ с высокой импульсной дозой 2–9 сГр/имп. Частота следования импульсов 5 Гц, длительность импульса 4 мкс. Оператор с пульта дистанционного управления регулирует все движения. На выходе устройства генерируются пульсирующие пучки электронов (энергия 3–9 МэВ) с очень высокой дозой за импульс (0.02–0.09 Гр/имп) в зависимости от энергии пучка и размеров аппликатора. Для предписанной дозы 20 Гр время облучения составляет 1–2 мин. Размеры и вес установки примерно такие же, как и у Mobetron.

Оба этих устройства могут использоваться в любой операционной комнате без специальной защиты, и не предъявляют специфичных требований к конструкции операционной. Специализированные устройства требуют только ограждения шириной порядка 15 см вокруг операционного стола.

#### 4.1.4. Томотерапия

Последние несколько лет физики и медики разрабатывают установки, позволяющие совмещать два или три метода томографии или методы лучевой терапии одновременно с методами диагностики. Одной из наиболее стремительно развивающихся технологий является томотерапия. Суть установки заключается в том, что вместо источника рентгеновского излучения, применяемого в компьютерном томографе, используется небольшой ускоритель электронов. Он в одном аппарате объединяет в себе



**Рис. 4.14.** Схема аппарата (а) и облучения (б) в методике томотерапии

возможности диагностики компьютерного томографа и радиотерапевтического уничтожения онкологических очагов пучками тормозных фотонов из ускорителя электронов. Установка, действующая на описанном принципе, представлена на рис. 4.14, а.

Для получения объемной картины ускоритель движется по спирали вокруг пациента, как показано на рис. 4.14, б. Методика томотерапии основана на послойном облучении из ускорителя веерным пучком тормозного излучения, который проходит сквозь тело пациента (на рис. 4.14 показано распространение пучка фотонов к противоположной стороне спирали), где фотоны регистрируются детекторами, как в компьютерном томографе.

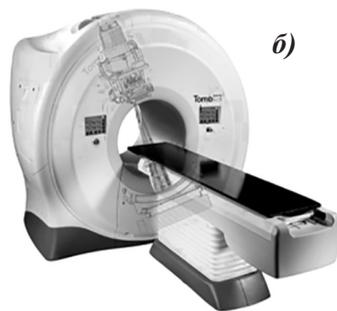
Новизна метода заключается в формировании уникального узкого (веерного) пучка ионизирующего облучения, позволяющего равномерно облучать опухоли большой протяженности без риска переоблучения отдельных участков. Кроме того, спад дозы в теле пациента происходит медленней по сравнению с использованием рентгеновского источника. Поэтому опухоль облучается более равномерно с каждого направления. На ускоритель устанавливается многолепестковый коллиматор (МЛК). Благодаря этому устройству, состоящему из тонких пластинок, они открываются и закрываются в автоматическом режиме по заданной программе. Компьютерная программа выбирает оптимальные углы (из  $360^\circ$ ) облучения на заданном срезе. Доходя до здоровой ткани, лепестки коллиматора закрываются, и облучение прекращается. Затем ускоритель перемещается по кругу в другое положение, и лечение начинается под другим углом. Таким образом, благодаря программе лучевого планирования практически исключаются неравномерно облученные участки.

До начала процесса лечения в систему планирования вводятся данные предлучевой подготовки, включающей в себя МРТ, КТ или ПЭТ-КТ-сканирование. Врачи-радиологи, составляя индивидуальный план лечения

пациента, обводят опухоль («оконтуривают») и окружающие здоровые ткани. Медицинские физики на основе этого плана создают один или несколько расчетов дозы (дозиметрический план лечения). После обсуждения выбирается оптимальный план.

В начале каждого сеанса лечения осуществляется быстрое КТ-сканирование. В этом случае повышается точность облучения, а лечение каждого пациента занимает меньше времени. Встроенное устройство визуализации определяет и проверяет локализацию опухолевой ткани, которую затем подвергают высокоточному облучению по программе лучевого планирования. При этом воздействие на чувствительные здоровые ткани остается незначительным. Таким образом, при томотерапии облучение происходит под контролем компьютерной томографии. Это позволяет сделать более четкими края облучаемой области и сохранить больше здоровых тканей, окружающих опухоль.

Система TomoTherapy, в отличие от кибер-ножа, относится к установкам радиотерапии, а не радиохирургии. Однако на ней, как и на установках стереотаксической радиохирургии, за один сеанс могут быть подавлены множественные патологические очаги. С помощью томотерапии за одну процедуру можно облучать участки до 150 см в длину (например, при облучении всего костного мозга или множественных метастазов). Обычный радиотерапевтический аппарат способен обработать лишь часть большой опухоли, поэтому облучение происходит зонами с возможным наложением границ. В процессе наложения полей облучения в окружающих тканях могут появиться так называемые горячие зоны, где доза облучения может существенно превышать допустимые значения, что вызывает повреждение здоровых тканей. Томотерапия способна равномерно облучать всю опухоль независимо от ее размеров без участков наложения полей, т. е. существенно снижается вероятность переоблучения окружающих тканей.



**Рис. 4.15.** Внешний вид установок томотерапии: *а)* HI-ART; *б)* Accuray

Для сравнения облучения опухоли на обычном радиотерапевтическом ускорителе и на системе томотерапии приведем пример. Когда мы используем систему томотерапии, курс лечения обычно длится 33 дня или 6.5 недель. Это быстрее, чем обычных ускорителях: 45 сеансов за 9 недель. Таким образом, поскольку томотерапия обладает высокой точностью, можно увеличить дозу одного сеанса и завершить курс лечения быстрее: при томотерапии пациент получает дозу  $225 \text{ сГр/день} \times 33 \text{ дня} = 7425 \text{ сГр}$ , что для обычного радиотерапевтического ускорителя соответствует  $180 \text{ сГр/день} \times 45 \text{ дней} = 8100 \text{ сГр}$ .

Первая установка, запущенная в эксплуатацию в России, находится в Воронежском межрегиональном медицинском центре ранней диагностики и лечения онкологических заболеваний. Вторая система установлена в московском Центре детской гематологии им. Д. Рогачева.

На рис. 4.15 представлен внешний вид установок TomoTherapy HI-ART и Assura.

## 4.2. Медицинские ускорители протонов и ионов

Р. Р. Уилсон, основатель лаборатории Ферми, в 1946 г. опубликовал в медицинском журнале «Радиология» статью, в которой отметил, что пучки протонов и тяжелых ионов будут идеально подходить для лечения больных раком, потому что инерционные характеристики этих частиц показывают, что выделение большей части энергии и, следовательно, биологическое повреждение происходят в непосредственной близости конца пробега частиц. Остановка пучка внутри опухоли существенно повысила бы доставленную в опухоль дозу, обеспечивая при этом минимальную дозу для здоровых тканей, расположенных вдоль входного пути пучка. Кроме того, поскольку частицы останавливаются в опухоли, нет по существу никакой дозы на выходе. Поскольку максимизация дозы в опухоли и минимизация дозы в окружающих здоровых тканях является одной из ключевых задач лучевой терапии, пучки заряженных частиц обладают преимуществом перед фотонами.

Для получения пучков протонов и ионов могут использоваться линейные ускорители, циклотроны и синхротроны. Однако линейные ускорители из-за их большой длины не нашли практического применения.

В ускорителях тяжелых заряженных частиц пробовали ускорять различные частицы от протонов до тяжелых ядер. С ростом атомного номера ядер

соотношение пик/плато улучшается. Однако перед пиком Брэгга возникает хвост в результате развала ядер пучка частиц при их взаимодействии с ядрами атомов вещества.

Для экспериментального облучения использовались ядра различных частиц. Однако в медицинских целях применялись пучки протонов, ионов углерода, а также  $\pi$ -мезоны, у которых тоже наблюдается пик Брэгга в глубинном распределении дозы.

**Медицинские ускорители протонов.** Более века назад Вильям Брэгг (William Bragg), изучая взаимодействие заряженных частиц с веществом, обнаружил, что протоны теряют почти всю свою энергию в самом конце своей траектории в веществе. Позднее Р. Уилсон показал: чтобы максимально облучить очаг заболевания и минимально затронуть окружающие ткани, наиболее эффективны пучки ускоренных протонов.

К. Тобиаш и Дж. Лоуренц первыми в 1952 г. использовали пучки протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц синхроциклотрона в Беркли (США) для медико-биологических исследований. В 1954 г. в Беркли на пучке протонов лечился первый пациент.

С 1956 г. подобные исследования начали проводиться в Швеции в Институте Густава Вернера (Уппсала) Б. Ларсоном на протонах с энергией 187 МэВ. Клинические исследования по применению протонов высоких энергий в лучевой терапии начались в 1959 г. в Гарвардском университете Р. Кьеллбергом на синхроциклотроне с энергией 160 МэВ. В 1990 г. был открыт первый госпиталь протонной терапии в Университете Лома Линда в Калифорнии на базе протонного синхротрона с энергией 250 МэВ.

Тяжелые ионы с энергией 400 МэВ впервые были применены в радиотерапии в Национальном институте радиологических исследований (NIRS) в 1994 г. в Чибе (Япония). В настоящее время в шести центрах проводят терапию только пучками ионов углерода, а еще в четырех (Хего в Японии, Гейдельберг в Германии, Шанхай в Китае и Павия в Италии) лечат и пучками протонов, и пучками ионов углерода.

Первый в СССР протонный пучок с необходимыми для лучевой терапии параметрами был создан в 1967 г. по предложению В. П. Джелепова на фазотроне 680 МэВ в лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна). Кроме того, в XX в. начали действовать еще два научных центра протонной лучевой терапии: ИТЭФ (Москва) и ЛИЯФ (Гатчина).

В настоящее время в России в медицинских учреждениях введены в строй и работают Центр протонно-лучевой терапии Медицинского института им. С. Березина (МИБС), медицинский протонный синхротрон в Обнинске (МРНЦ им. Цыба), завершается строительство медицинского Центра протонной лучевой терапии в Димитровграде.

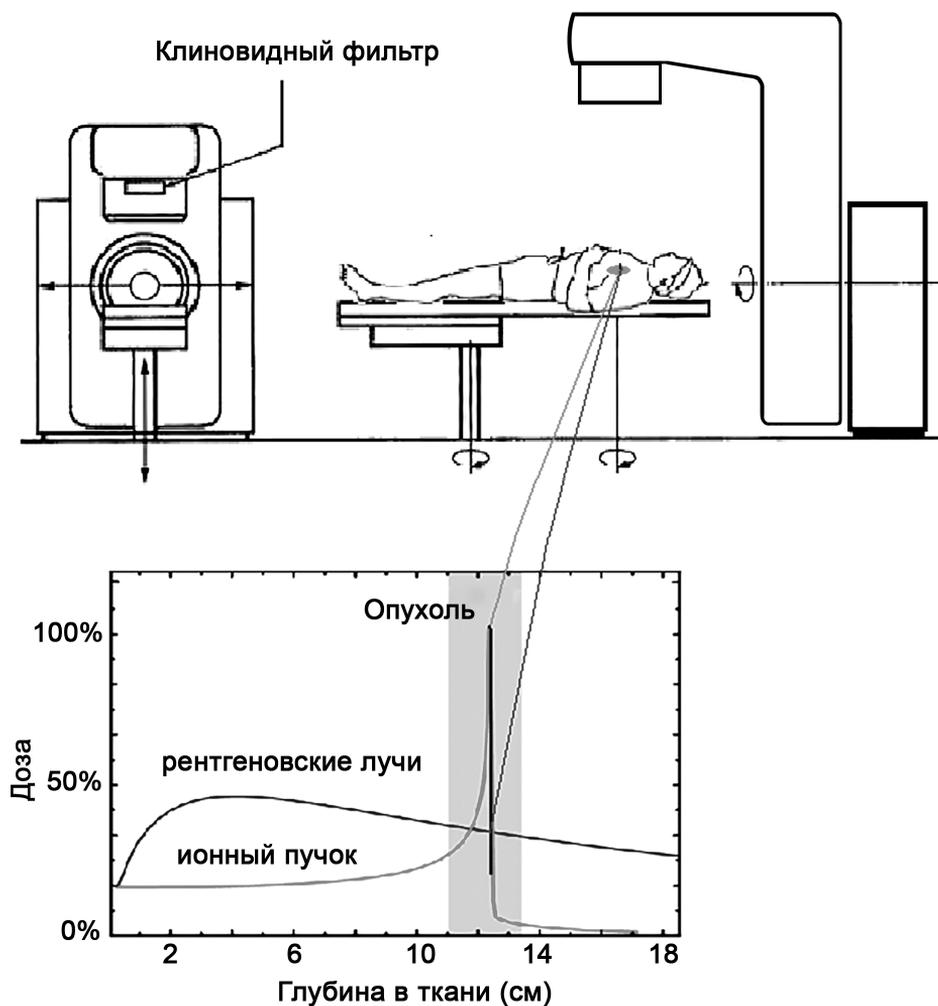


Рис. 4.16. Облучение пациента с использованием гантри

В лучевой терапии на протонах применяются циклотроны, фазотроны и синхротроны с энергией до 250 МэВ. Типичные энергии протонов в пучках, используемых для лечения, составляют 70–250 МэВ.

Особенность применения пучков протонов — наличие в распределении дозы в зависимости от глубины острого пика, называемого пиком Брэгга. Причина его появления заключается в следующем. Тяжелые заряженные частицы теряют энергию в среде в результате ионизационных потерь, неупругого рассеяния и ядерных реакций. Ионизационные потери энергии пропорциональны квадрату заряда частицы и приблизительно обратно пропорциональны квадрату

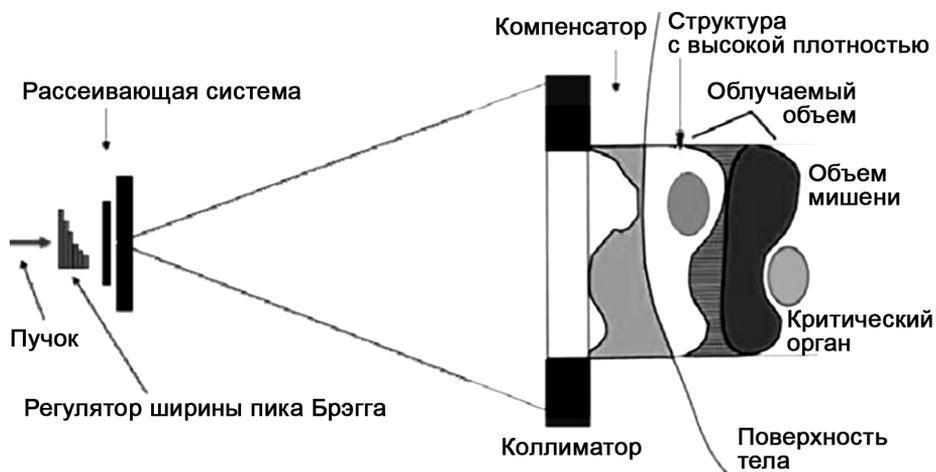


Рис. 4.17. Схема метода рассеяния

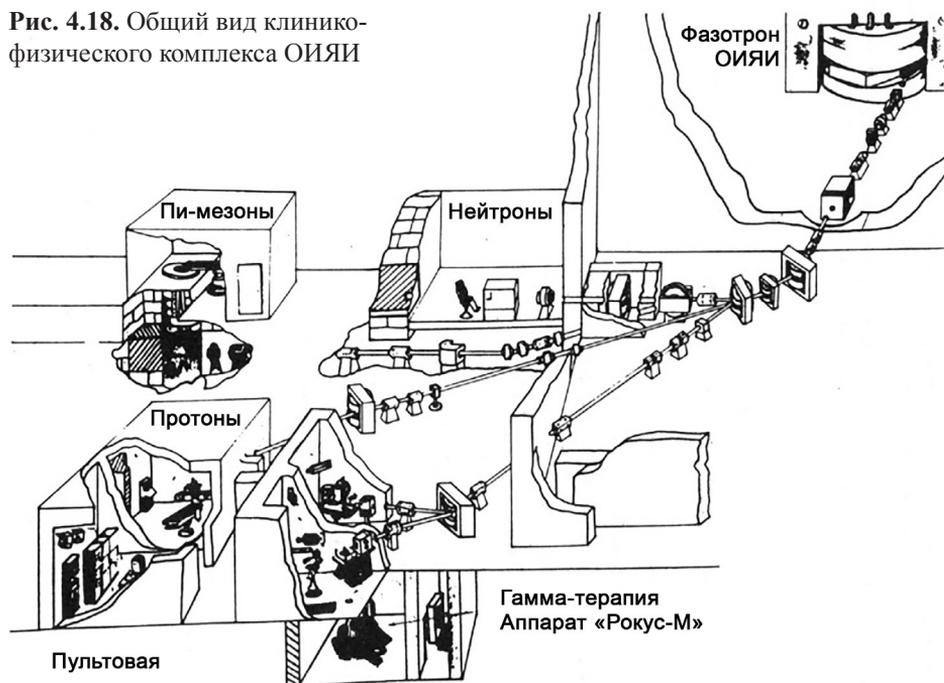
ее скорости. Поэтому с увеличением глубины проникновения тяжелых ионов и протонов в вещество энергетические потери на единицу пути (т. е. поглощаемая веществом доза) увеличиваются и дают в конце пробега острый максимум (рис. 4.16). Наличие в глубинных распределениях дозы максимума в конце пробега позволяет концентрировать большую дозу внутри объема мишени и уменьшать дозу в окружающих ее здоровых тканях. Этот факт и высокая степень точности попадания в мишень (~1 мм) оказываются полезными при использовании протонных пучков в лучевой терапии.

Протонная терапия имеет преимущество по сравнению с  $\gamma$ -излучением при лечении опухолей, прилегающих к особо чувствительным к ионизирующему излучению органам (головному и спинному мозгу, сетчатке глаза и т. д.). Для облучения опухоли по всей ее глубине острый пик Брэгга модифицируется в распределение, равномерное в некоторой области (рис. 4.16). При этом варьировать энергию тяжелых заряженных частиц на выходе ускорителя практически невозможно. Это достигается с помощью специальных фильтров-компенсаторов (рис. 4.17), установленных на пути пучка.

Обычно используют гребенчатые, вращающиеся, спиральные и другие фильтры. Принцип их действия сводится к преобразованию исходного моноэнергетического пучка в пучок с широким энергетическим спектром частиц. Пучок протонов проходит разный слой вещества фильтра и в результате ионизационных потерь образуется спектр протонов с разными энергиями. Подбором соответствующих параметров фильтра можно добиться ширины и равномерности «плато» с заданной точностью.

За последние годы был получен большой опыт лечения больных протонами, например в области онкоофтальмологии, радионейрохирургии.

Рис. 4.18. Общий вид клинико-физического комплекса ОИЯИ



В качестве примера приведем характеристики первого в мире медицинского комплекса протонной лучевой терапии в Лома Линде (США) и российских центров протонной лучевой терапии в ОИЯИ (Дубна), в МРНЦ (Обнинск), Центра протонно-лучевой терапии Медицинского института им. С. Березина (МИБС).

**Комплекс протонной терапии в Лома Линде.** Развитие протонной лучевой терапии связано с процессом создания специализированных госпитальных центров протонной лучевой терапии. Первый такой медицинский протонный ускоритель с 1990 г. действует в Лома Линде. К настоящему времени лечение на нем прошли более 5000 онкологических больных. В этом медицинском центре установлен синхротрон диаметром 7 м с интервалом энергии пучка протонов 70–250 МэВ.

Одним из важнейших элементов комплекса является устройство, получившее название гантри. Оно осуществляет поворот пучка частиц вокруг пациента, лежащего на кушетке. Устройство состоит из мощных поворотных магнитов, которые поворачивают пучок заряженных частиц в вертикальной плоскости так, что пучок направлен на пациента вертикально (обычно сверху). Основание гантри подвижно, что позволяет установке вращаться вокруг оси пациента. Пример такого устройства приведен на рис. 4.16. Видно, что направленный сверху пучок тормозится в теле пациента так, что пик Брэгга располагается в области тела, где находится опухоль.

**Комплекс протонной терапии в ОИЯИ.** На рис. 4.18 приведен клинический комплекс для лучевой терапии на базе фазотрона ОИЯИ с энергией 680 МэВ, расположенный в Дубне. Он имеет несколько выходных каналов пучка, которые используются в лучевой терапии для лечения разных локализаций опухолей. Характеристики фазотрона приведены в табл. 4.3. В комплексе созданы три кабины, в которые выводится пучок протонов, нейтронов и  $\pi^-$ -мезонов. Кроме того, в его состав входит  $\gamma$ -аппарат РОКУС.

Таблица 4.3

Характеристики фазотрона в Дубне

Энергия	680 МэВ
Диаметр магнита	600 см
Вес магнита	7200 т
Магнитное поле	1.66 Тл
Ток	1 мкА
Лечебные кабины	3
Ускоряющее напряжение	30 кВ

**Комплекс протонной терапии в Обнинске.** В 2015 г. в Обнинске запущен комплекс протонной лучевой терапии на базе протонного синхротрона с энергией 70–330 МэВ. На рис. 4.19 приведен внешний вид протонного синхротрона, а в табл. 4.4 его основные характеристики и параметры пучка протонов.

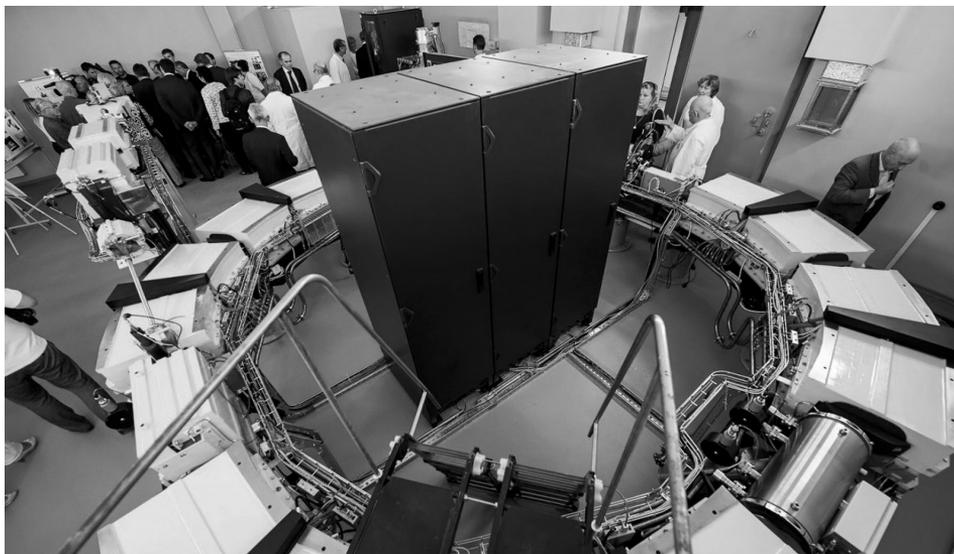


Рис. 4.19. Ускоритель протонов в Обнинске

Таблица 4.4

## Основные характеристики протонного комплекса в Обнинске

Энергия пучка	70–330 МэВ
Интенсивность пучка	$1 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$
Относительная погрешность энергии пучка	$\pm 0.15 \%$
Время ускорения до энергии 250 МэВ	не более 0.7 с
Диаметр ускорителя	5 м
Средняя потребляемая мощность	100 кВт
Масса комплекса	30 т
Максимальный размер поля облучения	не менее 400×400 мм
Минимальная доза облучения за фракцию	не менее 1.0 Гр
Максимальная доза облучения за фракцию	не более 1.0 Гр
Мощность дозы минимальная	не менее 0.5 Гр/мин
Мощность дозы максимальная	не более 15.0 Гр/мин

**Центр протонной терапии в Санкт-Петербурге (Гатчина, Ленинградская область).** Центр протонно-лучевой терапии Медицинского института им. С. Безрезина (МИБС) является первым размещенным в медицинском учреждении.

Используется сверхпроводящий изохронный циклотрон с энергией 250 МэВ, позволяющий облучать опухоли в пределах расположения по глу-



Рис. 4.20. Кабина для проведения процедур на протонном ускорителе МИБС

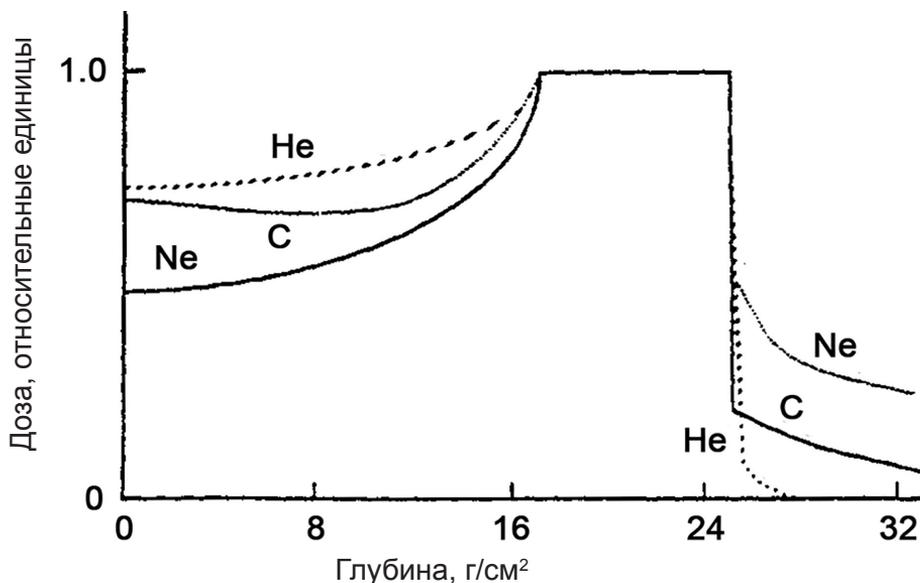


Рис. 4.21. Распределение дозы в веществе для ионов  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$

бине от 4 до 30 см. Особенность циклотрона — его компактность: диаметр сверхпроводящего циклотрона в почти 3 раза меньше обычного циклотрона на «теплых» магнитах.

В центре исследователи развивают метод протонно-фотонной терапии. Они оптимизировали IMRT план из 30 фракций и IMPT план из 30 фракций на основании их совокупной биологически эффективной дозы (BED). Затем наработки использовали для создания контрольного плана, представляющего собой простую комбинацию, в которой эти два метода доставляют одну и ту же дозу на мишень. На рис. 4.20 представлен вид кабины для проведения процедур на протонном ускорителе.

**Терапия легкими ионами.** Применение в лучевой терапии легких ионов (дейтронов,  $\alpha$ -частиц, ядер углерода) обусловлено преимуществами по сравнению с другими видами ионизирующего излучения, в том числе и протонами. На рис. 4.21 представлены модифицированные кривые Брэгга для ядер  $\text{He}^4$ ,  $\text{C}^{12}$ ,  $\text{Ne}^{20}$ .

Видно, что за пиком Брэгга наблюдается «хвост», который возникает из-за распада ядер в результате их столкновений с ядрами среды.

Ионы в веществе имеют конечный пробег, причем значение дозы в конце пробега оказывается существенно больше, чем у пучков протонов. От распределения дозы пучков протонов в веществе распределение дозы легких ионов отличается наличием максимума в конце пробега и малой величиной рассеяния пучка. Легкие ионы, как и протоны, имеют распределение дозы

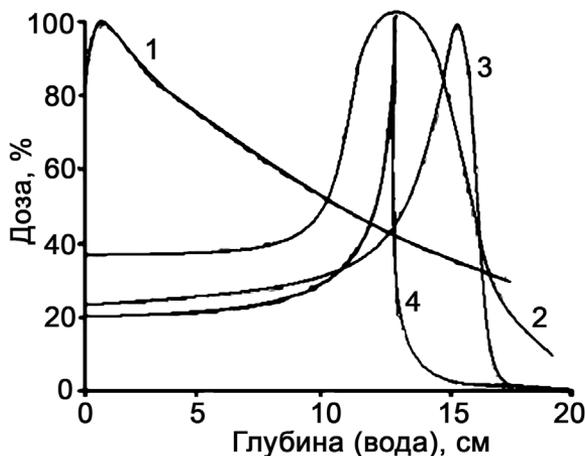
в виде узкого пика Брэгга; у ионов гораздо более острый пик по сравнению с протонами. У них также выше соотношение дозы в максимуме (пике Брэгга) и на входе в среду, а также меньше разброс пучка в поперечном направлении (1–2 мм). К примеру, ионы углерода рассеиваются в четыре раза меньше, чем протоны (рис. 4.22).

Из этого не следует, что, облучая все более тяжелыми частицами, мы будем получать лучший результат. Это связано с тем, что при росте массы растет вероятность распада ядра на фрагменты, что вызовет в организме нежелательное дополнительное облучение. За резким пиком в распределении дозы возникает «хвост», созданный фрагментами ядер. Его возникновение обусловлено следующим. Передаваемая среде энергия, а следовательно и доза, пропорциональны квадрату заряда:  $D \sim z^2$ .

Поэтому энергия, передаваемая веществу, будет меньше и, следовательно, они в веществе проникнут дальше:

$$D(z) \geq D(z_1) + D(z_2) \text{ при } z = z_1 + z_2.$$

Так как фрагменты распада ядер имеют больший, чем первичный ион, пробег, это приводит к появлению дозы за пиком Брэгга. Чем тяжелее ион, тем выше доза от фрагментов на глубине за пиком Брэгга. Также при использовании ионов происходит накопление токсичного вещества в организме. Оптимальными для адронной терапии считаются ионы углерода.



**Рис. 4.22.** Распределение дозы пучков тяжелых заряженных частиц и нейтронов в зависимости от глубины в воде: 1 — пучка нейтронов с энергией 30 МэВ; 2 — пучка  $\pi$ -мезонов; 3 — пучка протонов с энергией 160 МэВ (кривая Брэгга); 4 — пучка ионов углерода  $^{12}\text{C}$  с энергией 250 МэВ/нуклон

Углерод безвреден для организма. К тому же в биологических тканях при облучении образуется  $^{11}\text{C}$ , который со временем жизни примерно 20 мин переходит в  $\text{B}^{11}$ , излучая позитроны и нейтрино:



Позитроны, в свою очередь, аннигилируют с электронами, излучая  $\gamma$ -кванты:



Это позволяет увидеть область, пораженную пучком, и оценить точность попадания.

Исследования, проведенные за последнее время в области терапии легкими ионами от ядер гелия до железа показали, что наилучшее соотношение дозы в пике к дозе на входе в среду у углерода. У ядер  $^{12}\text{C}$  незначительной оказывается фрагментация (распад ядер на фрагменты при их взаимодействии с веществом). На рис. 4.22 сравниваются кривые Брэгга для пучков протонов и ионов (кривые 3 и 4). Видно, что кривая Брэгга для пучка углерода имеет выступ (хвост) за пиком, который обусловлен фрагментацией ядер углерода. Пробеги продуктов распада ядер сильно различаются между собой. Например, для ядер  $^3\text{H}$  и  $^3\text{He}$  пробеги различаются в три раза. Ядерные взаимодействия пучка ядер неона в воде и элементах системы проводки пучка приводят к потере  $\sim 8\%$  ядер, которые вступают в ядерные реакции. Вклад в интегральное значение дозы вторичных частиц для углерода составляет 10% для мишени размером 10 см. Ошибка, вносимая хвостом (расположенным за пиком Брэгга) в значение дозы, в который дают вклад вторичные частицы, образующиеся при взаимодействии ядер пучка и мишени, составляет 2–3%.

Пучки ускоренных ионов фокусируются электромагнитными линзами до небольшого диаметра, что позволяет локально облучать небольшие опухоли (например, гипофиз). Это свойство необходимо отметить по причине того, что облучаемые области зачастую вплотную примыкают к жизненно важным органам. Использование ионов позволяет уменьшить возможные осложнения в здоровых тканях.

Для лечения опухолей на глубине 20–30 см необходимы пучки тяжелых ионов с энергией 250–1000 МэВ/нуклон. Для разрушения поверхностных опухолей (например, меланом) достаточна энергия 70 МэВ/нуклон.

В настоящее время в разных странах ведутся разработки по созданию медицинских пучков из ядер углерода. В мире действует 7 центров лучевой терапии на пучках углерода, еще 4 строится.

В России работы по созданию таких пучков ведутся в Протвино (ИФВЭ) и Дубне (ОИЯИ). В Протвино работы находятся на завершающей стадии,

и скоро в нашей стране начнет действовать экспериментальный центр углеродной лучевой терапии.

В лучевой терапии несколько десятилетий назад экспериментально использовали  $\pi^-$ -мезоны (отрицательные пионы, масса которых в  $\sim 270$  раз больше массы электрона). Этот довольно экзотичный метод основан на использовании ядерных реакций с образованием  $\pi^-$ -мезонов.

В глубинном распределении дозы пионов, как и на пучках протонов, наблюдается пик Брэгга (рис. 4.22, кривая 3).

Интенсивность пучков невысока (в  $\sim 1000$  раз ниже, чем пучка протонов), а в пучках пионов много примесей других частиц. Поэтому сеанс облучения оказывается весьма длительным и, как следствие, дорогостоящим. С помощью пионов было пролечено всего около 1100 пациентов. В настоящее время этот метод в лучевой терапии не применяется.

### 4.3. Источники нейтронов в лучевой терапии

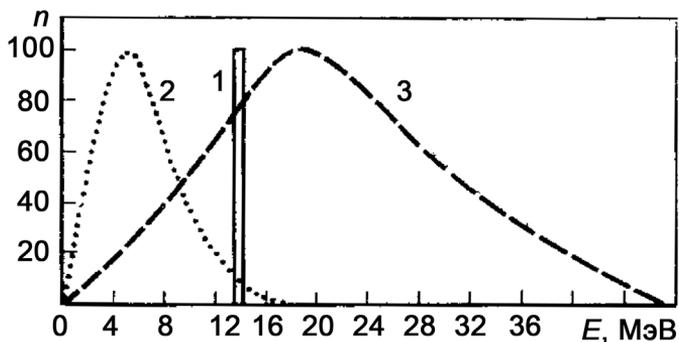
Нейтронная терапия в некоторых клинических ситуациях обладает преимуществом по сравнению с традиционными методами на пучках фотонов или электронов — это высокая эффективность повреждающего действия и слабая зависимость от насыщения клеток кислородом.

В лучевой терапии используют пучки быстрых нейтронов, а в нейтронзахватной лучевой терапии — пучки тепловых нейтронов.

В качестве источника нейтронов применяются реакторы и ускорители. В реакторах получают нейтроны с широким спектром энергий от 0 до 17 МэВ, средняя энергия нейтронов составляет около 2 МэВ. Однако количество нейтронов высоких энергий мало из-за быстрого уменьшения их числа с ростом энергии нейтронов. Поэтому нейтроны с энергией 14–15 МэВ обычно получают на ускорителях.

Пучки быстрых нейтронов с широким спектром энергий для лучевой терапии получают из ядерных реакций под действием заряженных частиц на циклотронах, линейных или высоковольтных ускорителях трансформаторного типа, которые часто называют генераторами нейтронов (дейтерий-третиевыми ( $D-T$ ) генераторами), а также в реакторах при распаде тяжелых ядер. Бомбардирующими частицами являются либо дейтроны, либо протоны; в качестве материала мишени обычно используют бериллий. В  $D-T$  генераторах в реакции





**Рис. 4.23.** Спектр нейтронов, получаемых: 1 — на генераторе нейтронов в основе реакции (4.7); на циклотронах в реакции (4.8) при энергии дейтронов 16 МэВ (2) и 50 МэВ (3) соответственно

получают поток моноэнергетических нейтронов с энергией 14–15 МэВ (рис. 4.22, кривая 1). В реакции



спектр нейтронов простирается от нулевой энергии до почти максимальной энергии дейтронов (рис. 4.23, кривые 2 и 3 для энергий дейтронов 16 и 50 МэВ соответственно).

Применение ускорителей для получения пучков нейтронов связано с использованием реакций (4.7) и (4.8). Высоковольтные ускорители дешевы и компактны. В них получается более интенсивный первичный пучок заряженных частиц, и, следовательно, интенсивность пучка нейтронов оказывается высокой. Циклотроны имеют преимущество над ними, поскольку позволяют получать нейтроны высоких энергий и спектр нейтронов имеет широкие пределы.

Используемые в терапии быстрые нейтроны с энергиями 30 МэВ имеют распределение дозы, близкое к  $\gamma$ -квантам (рис. 4.23, кривая 1), оставляя большую часть энергии на входе и прилегающих тканях и низкие дозы в объеме мишени. Максимум в распределении дозы находится на глубине 1–4 см, который с ростом энергии нейтронов медленно смещается в глубь вещества.

Отсутствие у нейтронов электрического заряда приводит к тому, что они могут проникать в вещество на большую глубину. В отличие от других типов ионизирующего излучения число актов ионизации, вызываемых нейтронами, в значительной степени зависит от элементного состава вещества, через которое нейтроны проходят. Это обстоятельство сильно затрудняет их дозиметрию.

Как показали исследования, раковые клетки некоторых злокачественных опухолей, обладающих повышенной устойчивостью к облучению  $\gamma$ -квантами,

разрушаются при воздействии на них пучками быстрых нейтронов. К таким опухолям можно отнести большинство медленно растущих злокачественных новообразований, таких как аденома простаты, меланомы, опухоли головного мозга, шеи.

При проведении сеансов лучевой терапии на пучках нейтронов значительная доза передается поверхности тела, что вызывает различные осложнения, возникающие после применения курса лечения. В мире лишь несколько центров располагают опытом клинического лечения пучками быстрых нейтронов, например МРНЦ им. Цыба в Обнинске (более 500 пациентов), клиника лучевой терапии и радиологической онкологии в техническом университете Мюнхена.

## 4.4. Ускорители в лучевой диагностике

В лучевой диагностике ускорители тоже играют значительную роль. На них нарабатывают радиоактивные изотопы, которые используются в диагностических приборах. Рассмотрим приборы, изотопы для которых нарабатываются как в реакторах, так и на ускорителях. Это  $\gamma$ -камера, однофотонный эмиссионный томограф (ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионный томограф (ПЭТ).

**Гамма-камера.** На сегодняшний день  $\gamma$ -камера является одним из основных приборов для получения скинтиграфических изображений. В комплексе с компьютером  $\gamma$ -камера позволяет проводить основные виды радионуклидных исследований.

Гамма-камера<sup>121</sup> основана на использовании радиоактивных изотопов таллия-201 ( $^{201}\text{Tl}$ ) и технециума-99м ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), которые вводятся в тело человека. Они имеют приемлемый для проведения исследований период полураспада 72.9 и 6 ч соответственно. Нароботка изотопов для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии осуществляется на циклотронах или линейных ускорителях протонов с энергией более 20 МэВ.

Гамма-камера (рис. 4.24) состоит из коллиматора, детектора на базе скинтиляционного кристалла  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , коллиматора, фотоэлектронных умножителей, электронной схемы определения положения и величины вспышек, компьютера для получения изображения и консоли оператора. На ней получают двумерное изображение органов человека.

<sup>121</sup> Идея  $\gamma$ -камеры (принципиально нового диагностического прибора) предложена в 1949 г. Д. Коуплендом и Е. Бенжамином. Основной вклад в развитие этого метода сканирования и создание гамма-камер, начиная с 1952 г., внесли Г. Ангер и Д. Мэллард. Первая  $\gamma$ -камера была создана американским инженером Ангером в 1966 г. Она состояла из двухкоординатного сканера с скинтиляционными счетчиками (кристаллами  $\text{NaI}(\text{Tl})$  небольшой толщины ~12 мм и диаметром более 25 см), а также блоком сборки и обработки сигналов со счетчиков.

Испускаемые из органов человека фотоны регистрируются сцинтилляционным детектором. Он представляет собой монокристалл NaI(Tl) толщиной около 12 мм и диаметром более 250 мм. Над ним располагаются фотоэлектронные умножители. От их количества зависит разрешающая способность  $\gamma$ -камеры.

В сцинтилляционном детекторе поглощенные или рассеянные  $\gamma$ -кванты преобразуются в фотоны видимого излучения, их число пропорционально поглощенной в сцинтилляторе энергии  $\gamma$ -кванта. Фотоумножители преобразуют световую вспышку в сцинтилляторе в импульс тока, который регистрируется спектрометрической аппаратурой. Амплитуда импульса пропорциональна поглощенной энергии.

Важным элементом установки является коллиматор. Он позволяет избежать искажений получаемых сцинтиграмм за счет поглощения  $\gamma$ -квантов, падающих под некоторым углом к центральной оси его отверстий. Такие фотоны не попадают на кристалл.

По распределению фотонов определяется распределение изотопов в тканях, и с помощью компьютера осуществляется их визуализация.

Обычно используют многоканальные коллиматоры, представляющие собой свинцовую пластину с множеством отверстий, через которые происходит проникновение  $\gamma$ -квантов от объекта к сцинтилляционному кристаллу. Для проведения исследований с радионуклидами, обладающими различными энергиями излучения, используют низко-, средне- и высокоэнергетические коллиматоры. Толщина свинцовых стенок между отверстиями коллиматора должна быть тем больше, чем выше энергия  $\gamma$ -излучения, предполагаемого для регистрации.

Вероятность взаимодействия  $\gamma$ -кванта с кристаллом зависит от его плотности и толщины, а также от энергии излучения. При поглощении фотона сцинтиллятором возникают фотоны в оптической области спектра (около 10% потерянной энергии). Длина волны излучения 410 нм оказывается оптимальной для регистрации ФЭУ. Высокоэнергетические фотоны покидают пределы кристалла. Длительность световой вспышки в кристалле должна быть минимальной. Для наиболее распространенного в радионуклидной диагностике кристалла NaI(Tl) продолжительность сцинтилляций составляет 0.8 мкс.

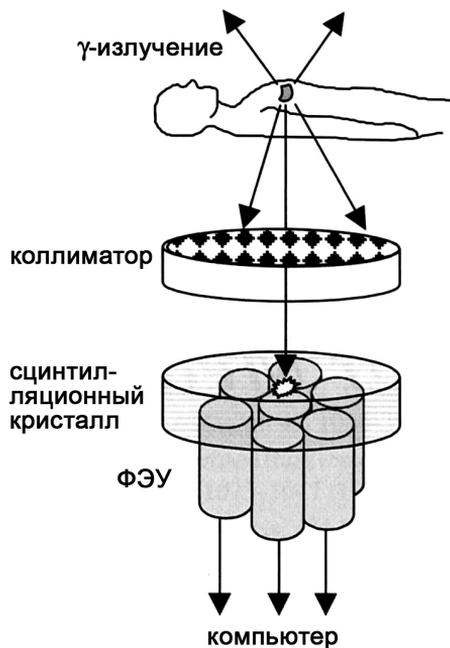


Рис. 4.24. Устройство  $\gamma$ -камеры

В современных  $\gamma$ -камерах кристалл обычно имеет удобную для проведения исследований четырехугольную форму и размеры  $450 \times 600$  мм, обеспечивающие поле видения не менее  $350 \times 510$  мм. Толщина кристалла — 12,7 мм. Для регистрации сцинтилляций, как правило, используют около 60 ФЭУ с диаметром фотокатода 3 и 2 дюйма. Помимо преобразования сцинтилляционных вспышек в электрические сигналы в ФЭУ происходит их усиление примерно в  $10^6$  раз. Конструктивные особенности  $\gamma$ -камеры обеспечивают хорошее пространственное разрешение в сочетании с высокой скоростью регистрации  $\gamma$ -излучения.

В настоящее время в медицине работает ~19 000  $\gamma$ -камер, а у нас в стране примерно 240 единиц. С развитием вычислительной техники  $\gamma$ -камеры получили дальнейшее развитие. К числу ведущих производителей и поставщиков гамма-камер относятся фирмы «Siemens», «General Electric», «Philips», «Sopha Medical». Цена установок с двумя детекторами — \$600 тыс. США и более.

Были созданы и успешно используются более совершенные диагностические приборы — однофотонные эмиссионные компьютерные томографы.

**Однофотонный эмиссионный компьютерный томограф (ОФЭКТ).** Совершенствование  $\gamma$ -камер и разработка новых программ для специализированных ЭВМ привели к созданию на рубеже 1970–1980-х гг. нового типа приборов для радионуклидной диагностики — однофотонных эмиссионных компьютерных томографов. В ОФЭКТ, в отличие от  $\gamma$ -камеры, осуществляется множество снимков, по которым строится трехмерное изображение объекта.

Для диагностики всего тела используется либо подвижный детектор, который перемещается вдоль пациента, либо подвижный стол, который перемещается под неподвижным детектором. В ОФЭКТ-системах применяют подвижную установку, называемую гантри<sup>122</sup>. К ней крепятся детектор и коллиматоры, которые вращаются по круговой, эллиптической или повторяющей контур тела траектории. Некруговые траектории позволяют детектору быть ближе к телу пациента, таким образом увеличивая пространственное разрешение.

Главное преимущество ОФЭКТ состоит в возможности получения плоскостных срезов изучаемых органов. Он позволяет визуализировать в виде плоскостных сечений



**Рис. 4.25.** Однофотонный эмиссионный компьютерный томограф фирмы Philips

<sup>122</sup> Гантри — это устройство для вращения источника излучения или детектора вокруг тела человека.

распределение радиофармпрепарата, введенного в тело человека. Общий вид установки представлен на рис. 4.25.

ОФЭКТ-изображения строятся по серии (обычно 64) плоских снимков. Компьютер позволяет создать из них трехмерные изображения объекта исследований.

Преимущество ОФЭКТ, по сравнению с исследованиями на  $\gamma$ -камере, состоит в том, что восстановленное изображение свободно от наложений на исследуемый орган соседних изображений, что чрезвычайно важно для диагностики.

ОФЭКТ устроен следующим образом. Он имеет два детектора, расположенных относительно друг друга под углом 180 или 90° (в настоящее время оптимальным вариантом считается использование четырех детекторов). На поверхности диафрагмы перед детекторами имеются небольшие отверстия. Диафрагма имеет определенную толщину, поэтому в детектор могут попасть фотоны не из любой точки тела. Тем самым обеспечивается высокое пространственное разрешение, которое составляет примерно 1.5 мм. Чувствительность детектора позволяет регистрировать импульсы на уровне 12 отсч./с, что соответствует дозе примерно в 1 мкКи. Для расширения анатомической информации при проведении радионуклидной диагностики в последние годы разработаны совмещенные ОФЭКТ/КТ системы, позволяющие одновременно проводить радиоизотопные и рентгеновские компьютерно-томографические исследования общего назначения в кардиологии, онкологии и неврологии. Здесь за счет быстрого совмещения сцинтиграфических и КТ-изображений достигается существенное повышение точности диагностики.

**Позитрон-эмиссионный томограф (ПЭТ).** Одним из примеров использования ускорителей в лучевой диагностике<sup>123</sup> является позитрон-эмиссионный томограф<sup>124</sup>. Если ультразвуковая, рентгеновская и магнитно-резонансная

<sup>123</sup> Первое применение радиоизотопа  $I^{131}$  для диагностики заболеваний щитовидной железы относится к концу 1930-х гг. Ранние разработки устройств визуализации в 1950-х гг. представляли собой сканеры с двухкоординатным сканированием и сцинтилляционные камеры. В клинической практике эти типы устройств стали широко использоваться к середине 1960-х гг. Именно с этого периода камера Энгера ( $\gamma$ -камера) становится одним из основных технических средств визуализации с помощью изотопов.

<sup>124</sup> Американский химик-ядерщик А.П. Вольф исследовал такие радиоизотопы, как углерод-11, используемые в ядерных методах визуализации для диагностики внутренних органов человека. Его научные труды значительно способствовали разработке позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Для ПЭТ используются специальные сканеры, которые позволяют обнаруживать радиоизотопы внутри тела пациента и получать изображения внутренних органов. Первый прототип ПЭТ-сканера появился в 1952 г. в Массачусетском госпитале. Он имел два детектора на основе йодистого натрия, расположенных друг против друга, и позволял получать изображения, основанные как на обнаружении совпадения событий, так и на дисбалансе. Первые ПЭТ-сканеры с множеством детекторов были созданы в начале 1960-х гг. в нескольких научных центрах и представляли собой системы с кольцом из 32 датчиков и разрешением

томография проявляют структуру органа на стадии ее патологического изменения, то ПЭТ способен зарегистрировать изменения в обменных процессах, которые этому предшествуют, помогая самому раннему распознаванию патологических сдвигов задолго до появления морфологических изменений. Полный ПЭТ-центр включает в себя ПЭТ-сканер и ускоритель — циклотрон с энергией до 20 МэВ, на котором нарабатываются короткоживущие изотопы, излучающие позитроны.

Действие прибора основано на следующих основных физических идеях. Во-первых, на ускорителях в ядерных реакциях получают изотопы, испускающие позитроны.

Во-вторых, используется их аннигиляция при взаимодействии с электронами.

В-третьих, используются схемы совпадений, регистрирующие фотоны, одновременно попавшие в кристаллы.

В-четвертых, используются кристаллы с высокой эффективностью регистрации фотонов.

И, конечно, в-пятых, применяется сложное математическое обеспечение для анализа и обработки данных.

Физические механизмы в ПЭТ выглядят так. При распаде радиоактивные изотопы испускают позитрон, который проходит в окружающих тканях расстояние, равное 1–3 мм, теряя энергию при соударении с молекулами и атомами биологической ткани. В момент остановки позитрон, взаимодействуя с электроном, аннигилирует в реакции (4.6), превращаясь в два фотона с энергией 0.511 МэВ, которые разлетаются в противоположные стороны. Эти фотоны регистрируются кристаллами — сцинтилляционными счетчиками. При попадании фотонов в кристаллы, называемые сцинтилляторами, происходит вспышка света, которая регистрируется фотодиодами, а затем сигнал усиливается схемой умножения. Среди всех вспышек специальными электронными схемами отбираются те пары фотонов, сигналы от которых поступили одновременно (такие схемы получили название схем совпадений). Принцип действия ПЭТ-томографа представлен на рис. 4.26.

Основной элемент ПЭТ — детектор, состоящий из большого числа сцинтилляционных кристаллов, среди которых каждые два противоположно расположенных кристалла попарно включены в схему совпадений.

Множество детекторов образует кольцо диаметром 80–100 см и шириной 10–20 см. Для снижения влияния внешнего излучения наружная поверх-

---

более 2 см. В 1970-х гг. для обработки данных стали использовать алгоритм обратного проецирования. На рубеже 1970–1980-х гг. эксперименты по потреблению опухолями глюкозы, меченой  $\beta^+$ -радиоактивными изотопами углерода и фтора, привели к идее диагностики патологий в теле человека по регистрации на совпадение двух фотонов, возникающих при аннигиляции позитронов. Эти работы и заложили основы метода позитрон-эмиссионной томографии. Американские исследователи. М. Тер-Погосян, М. Фелпс, Е. Хоффман разработали первый ПЭТ-томограф.

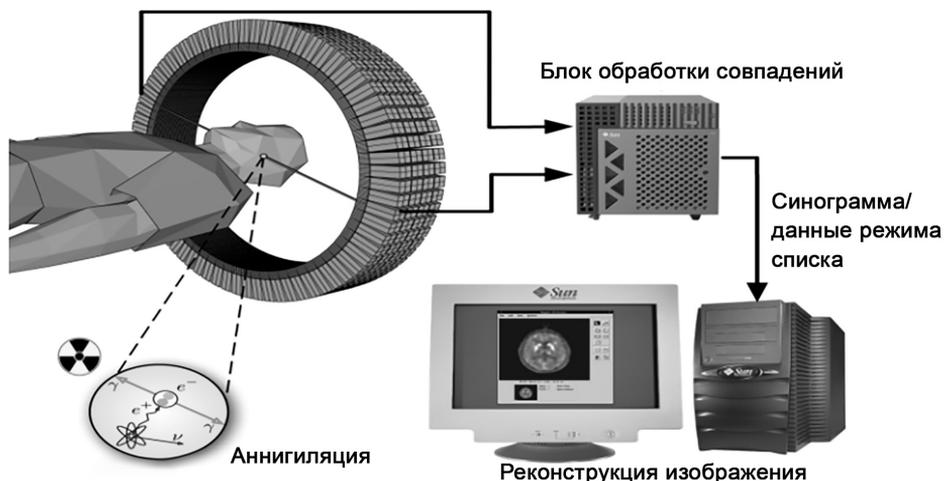


Рис. 4.26. Принцип действия ПЭТ томографа

ность кольца детекторов имеет свинцовый экран. Большинство сканеров может работать как в посрезовом режиме, когда аксиальная коллимация создается тонкими вольфрамовыми кольцами, называемыми септами, так и в трехмерном режиме, когда септа втягивается и совпадение регистрируется между всеми возможными парами детекторов.

Все фотоны, зарегистрированные только одним из противоположащих детекторов, или с интервалом, превышающим время достижения фотонами обоих детекторов, выбраковываются специальными электронными схемами совпадения.

В качестве материала детекторов для ПЭТ обычно применяется германат висмута. Он за счет высокой плотности обеспечивает в три раза большую чувствительность по сравнению с кристаллами NaI (Tl). Детекторы имеют небольшие размеры, порядка  $6 \times 20 \times 12$  мм. Поэтому достигается высокое пространственное разрешение. В этом случае удается численно оценить активность накопленного РФП в малых ( $\sim 1$  см<sup>3</sup>) объемах тканей.

Достаточно высокая энергия фотонов (0.512 МэВ), образующихся при аннигиляции позитронов, позволяет на практике не учитывать поглощение в тканях.

При размещении набора сцинтилляционных детекторов вокруг источника излучения (тела пациента) можно определить направление линии, вдоль которой происходит аннигиляция, а путем измерения интервала времени между сцинтилляциями на первом и втором парных детекторах определить место испускания фотона. Время, в течение которого схема совпадений регистрирует фотоны, составляет 10 пс.

ПЭТ-исследование включает в себя производство изотопа, его подготовку к форме, пригодной для воздействия на определенные ткани или органы, транспортировку к месту использования, введение инъекций, осуществление процедуры исследования на ПЭТ-сканере, получение ПЭТ-данных, их обработку, а затем интерпретацию. Достаточно сложной является система производства радиоизотопов: получение изотопов на циклотроне; создание биологического синтезатора, присоединяющего их к молекулам; автоматизация процесса производства на базе компьютерной техники.

В мире создана целая индустрия медицинских циклотронов средних энергий и высокоэффективных мишеней, позволяющих получать необходимые значимые активности (более 10 Ки) короткоживущих  $\beta$ -активных изотопов. На рис. 4.27 показан внешний вид ПЭТ-циклотрона, установленного в Магнитогорском ПЭТ-центре.

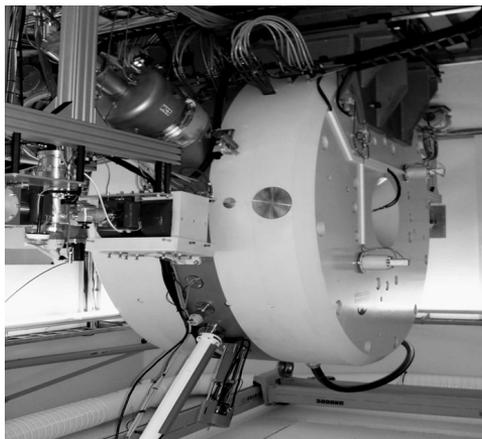


Рис. 4.27. Внешний вид ПЭТ-циклотрона

Синтез радиофармпрепаратов (РФП)<sup>125</sup> требует высокого уровня автоматизации. Это обусловлено требованиями радиационной безопасности. Нормы предусматривают поэтапный автоматический контроль процесса синтеза как основной фактор, гарантирующий качество полученного РФП. Поэтому диагностика с использованием ПЭТ-томографа — сложное и дорогостоящее исследование.

Для ПЭТ-исследований используются изотопы легких элементов, входящих в естественный состав тела или близкие к ним по атомному номеру. В ПЭТ применяются позитрон-излучающие изотопы элементов, которые в результате  $\beta^+$ -распада испускают позитроны ( $\beta^+$ -распад). Характеристики изотопов  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  и  $^{18}\text{F}$  представлены в табл. 4.5.

Оптимальными характеристиками для использования в ПЭТ обладает радиоактивный изотоп  $^{18}\text{F}$ . У него наибольший период полураспада и наименьшая энергия испускаемых позитронов. Это позволяет получать ПЭТ-изображения высокой контрастности при низкой дозовой нагрузке на пациентов. С другой стороны, низкая энергия позитронов, испускаемых ядрами  $^{18}\text{F}$ , обеспечивает высокое пространственное разрешение ПЭТ-изображений. Пространствен-

<sup>125</sup> Это вещества, предназначенные для наблюдения и оценки физиологических функций отдельных внутренних органов. Характер распределений РФП в организме определяется способами его введения, а также такими факторами, как величина кровотока объема циркулирующей крови и наличием того или иного метаболического процесса.

Таблица 4.5

Ядерно-физические характеристики основных радионуклидов для ПЭТ

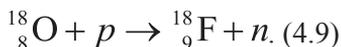
Радионуклид	Ядерная реакция получения	$T_{1/2}$ , мин	$E_{\max}$ , МэВ	$l_{\text{ср}}$ позитрона в воде, мм
$^{11}\text{C}$	$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$	20.4	0.960	1.7
$^{13}\text{N}$	$^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$	9.96	1.198	2.0
$^{15}\text{O}$	$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$ $^{15}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}$	2.03	1.732	2.7
$^{18}\text{F}$	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(d, \alpha)^{18}\text{F}$	109.8	0.633	1.4

ное разрешение определяется пробегом позитронов в биологической ткани до момента их аннигиляции с электроном. Чем меньше энергия позитронов, тем меньше их пробег, и, следовательно, лучше пространственное разрешение.

Однако наличие скорости у части позитронов в момент их аннигиляции приводит к отклонению угла разлета фотонов от  $180^\circ$  и несколько увеличивает неопределенность в расположении точки аннигиляции.

Кроме того, большой период полураспада  $^{18}\text{F}$  позволяет обеспечить возможность транспортировки РФП, изготовленных на его основе, из централизованного места производства в клиники и институты, имеющие ПЭТ-сканеры, а также расширить временные границы ПЭТ-исследований и синтеза радиофармпрепаратов.

Для производства  $^{18}\text{F}$  используют циклотроны с энергиями до 18 МэВ. Выбор энергии ускорителя обусловлен реакцией, необходимой для превращения стабильного изотопа кислорода  $^{18}_8\text{O}$  в изотоп  $^{18}_9\text{F}$ :



Изотоп  $^{18}_8\text{O}$  представляет собой примесь 0.2% в кислороде, выделенном из воздуха. Затем  $^{18}_9\text{F}$  используется для создания радиофармпрепарата фтордезоксиглюкозы.

При получении  $^{11}_6\text{C}$  в ядерной реакции:  $^{14}_7\text{N} + p \rightarrow ^{11}_6\text{C} + \alpha$  изотоп углерода при облучении газовой смеси может оказаться в составе химических соединений  $\text{CO}_2$  или  $\text{CH}_4$ . Из них может быть получен целый ряд других, более сложных соединений. Достоинством изотопа  $^{11}_6\text{C}$  является то, что он входит в состав соединений, из которых состоит биологическая ткань.

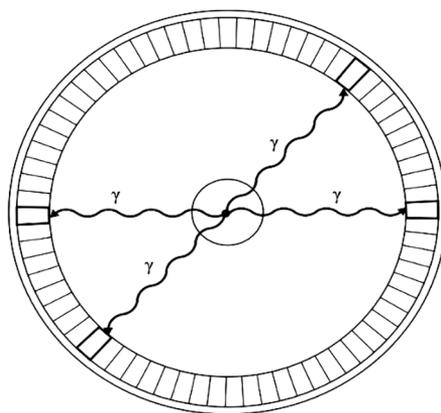
В медицине ПЭТ широко используется для диагностики различных заболеваний, особенно неврологических, онкологических и сердечно-сосудистых. Радиоактивные изотопы вводятся в тело человека. ПЭТ позволяет осуществлять

раннюю диагностику различных, прежде всего онкологических, заболеваний до появления структурных изменений, что существенно улучшает прогноз и качество лечения.

Математическую обработку результатов измерений обеспечивает программное обеспечение томографа. В томографе регистрируются угловые и линейные значения, суммирование которых дает двумерную картину распределения изотопа в теле человека. Поскольку регистрация аннигиляционных фотонов происходит противоположно расположенными детекторами, то излучающий изотоп и эти детекторы расположены на одной линии (рис. 4.28). Эта линия, соединяющая детекторы и объект, используется для восстановления распределения изотопов в тканях  $f(x_1, x_2)$ . Таким образом, существует возможность определения совпадений на нескольких углах (расходящийся пучок).

Важным аспектом клинической ПЭТ является необходимость в быстром и эффективном программном и аппаратном обеспечении. После завершения сбора информации программное обеспечение должно позволять формировать предварительные изображения до ухода пациента. Конечные изображения при стандартных исследованиях должны быть готовы в течение одного часа после окончания исследования, что требует максимальной автоматизации процесса.

Для проведения измерений могут использоваться кольцо или набор колец из нескольких сцинтилляционных детекторов. Так, например, ПЭТ-сканер «Neuto ECAT III» для исследования головного мозга состоит из восьми колец диаметром 62 см, содержащих 320 кристаллов. Считывание информации с каждого блока из 32 кристаллов осуществляется четырьмя ФЭУ по методу совпадений сигналов на детекторах соседних колец, что позволяет одновременно получать 15 томографических срезов с шагом 6.5 мм. Более современные ПЭТ-сканеры имеют до 16 плоскостей колец, что обеспечивает суммарно 31 поперечную плоскость. Разрешение составляет около 5 мм по всем направлениям. С дискретизацией 3 мм можно проводить исследования без изменений положений детекторов. Современный ПЭТ-сканер «ECAT 47» имеет 24 кольца диаметром 82 см с 9216 кристаллами. Внешний вид ПЭТ-сканера показан на рис. 4.29.



**Рис. 4.28.** Совпадающие детекторы в ПЭТ-сканере

Тем не менее динамика развития метода ПЭТ и его внедрения в повседневную клиническую практику очень высока, несмотря на большую стоимость процедур. Так, в 2002 г. в мире насчитывалось около 150 ПЭТ-центров. В 2005 г. их количество увеличилось на порядок и составило ~2400 единиц. В 2010 г. таких центров было создано 4000, а к 2015 г. более 5200. В России на сегодняшний день имеется семь ПЭТ-центров,

в состав которых входит 22 сканера в Москве, Санкт-Петербурге и Челябинске.

Для повышения информативности ПЭТ-исследований и решения проблемы пространственной ориентации при мелкоочаговых и метастатических поражениях в настоящее время разработаны комбинированные ПЭТ/КТ-сканеры, включающие ПЭТ-сканер и КТ-томограф. На рис. 4.30 представлен комбинированный ПЭТ/КТ-сканер. Конструктивно ПЭТ/КТ-сканер представляет собой позитрон-эмиссионный и компьютерный томографы, размещенные в одном гантри (обычно КТ расположен перед ПЭТ). Современные ПЭТ/КТ-сканеры имеют апертуру гантри 70 см и ширину 100 см.

Сканеры могут использоваться как вместе, так и независимо друг от друга. КТ-сканер может быть многосрезовым с пошаговым или спиральным режимами сбора данных и различными скоростями вращения трубки; ПЭТ-сканер может работать в двух- или трехмерном режимах. Первым этапом сбора данных является получение базового изображения, служащего для задания границ области ПЭТ/КТ-исследования. КТ-изображения получают при энергии рентгеновского излучения 100–140 кэВ и различных силах тока в зависимости от цели исследования. Затем пациент перемещается в ПЭТ-сканер и позиционируется в то же анатомическое положение. Сбор данных на этом этапе занимает 3–5 мин, затем ПЭТ-изображения восстанавливаются с учетом коррекции по КТ-изображениям. Полученные КТ-изображения обычно имеют матрицу 512×512, а ПЭТ — 128×128.



**Рис. 4.29.** Современный ПЭТ-сканер



**Рис. 4.30.** Комбинированный ПЭТ/КТ-сканер «Gemini GXL» (Philips Medical Systems)

Одновременное получение функциональной и анатомической информации позволяет повысить качество исследования за счет улучшения качества изображения и повышения точности определения локализации образований до 98%.

## 4.5. Ускорители в ядерной медицине

**Производство изотопов.** В этом направлении основная задача физиков — производство необходимого для радионуклидной терапии набора изотопов с требуемыми для определенных процедур характеристиками: типом частиц, их энергией, временем полураспада и активностью ядер.

В терапевтических применениях, как и при диагностике, период полураспада изотопа должен быть достаточно большим, что позволяет транспортировать его от места производства до мест конечного использования без чрезмерных потерь. В то же время он должен оставаться достаточно малым, чтобы свести к минимуму нежелательные дозы облучения для пациента после завершения процедуры.

Среди изотопов, использующихся в радионуклидной терапии, в 1960–1970-е гг. наибольшее распространение получили методики лечения с использованием изотопов  $^{32}\text{P}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ . К настоящему времени перечень нуклидов, используемых с лечебными целями, значительно расширился — для медицины производится более 45 видов радионуклидов. В том числе в диагностических целях используется около 27 видов радионуклидов, в терапевтических целях — около 37 (есть некоторые изотопы, которые используются для обеих целей). В табл. 4.6 и 4.7 представлены характеристики таких наиболее часто используемых изотопов. Сегодня в клинической практике успешно применяются изотопы  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{186}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{169}\text{Er}$ ,  $^{223}\text{Ra}$  и др.

Изотопы, используемые в медицине, получают в реакторах или на ускорителях протонов и ионов.

Для производства изотопов в мире в 1998 г. использовалось 200 циклотронов, в 2007 г. — 350, в 2016 г. — около 700, т.е. каждые 9 лет их число удваивается. Циклотроны в зависимости от их максимальной энергии могут производить разное число изотопов. Поэтому их условно делят на четыре уровня в зависимости от энергии: до 10 МэВ, до 20 МэВ, до 45 МэВ, до 70 МэВ. В первом случае производится четыре изотопа для ПЭТ-диагностики, во втором случае — 11 изотопов, в третьем — 19, в четвертом — более 30. В мире в более чем 10 000 клиник проводят более 30 млн. процедур в год.

К 2010 г. 232 исследовательских реактора в 56 странах — членах МАГАТЭ использовались для производства изотопов. В последние годы возможности

использования фотоядерных реакций для производства изотопов исследуются все шире.

Некоторые радиоактивные изотопы производят при высоких энергиях частиц. Например, в рамках Изотопной программы Министерства энергетики США в национальных лабораториях на крупных ускорительных комплексах: в Брукхейвенской лаборатории используются пучки протонов с энергией 200 МэВ, а в Лос-Аламосской лаборатории — протонный пучок с энергией 100 МэВ. Эти комплексы являются основными источниками для нескольких изотопов (например,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Sr}$ ), требующих высокой энергии пучков, и для представляющих исследовательский интерес изотопов типа  $^{67}\text{Cu}$ . Еще более высокие энергии требуются для производства полезных в биологических и медицинских исследованиях изотопов, например  $^{32}\text{Si}$  и  $^{26}\text{Al}$ .

Достижения в областях ускорителей частиц высоких энергий дают возможность производства изотопов в реакциях расщепления. Например, пучка протонов с энергией 200 МэВ мощностью 100 кВт, бомбардирующего мишень из низкообогащенного урана, достаточно для обеспечения спроса на  $^{99}\text{Mo}$  в США.

Особенно следует отметить исследования по получению изотопов для медицинских целей. Это важная проблема, поскольку известно, что сечения фотоядерных реакций как минимум на порядок меньше сечений реакций на пучках тяжелых частиц и нейтронов. Поэтому выходы продуктов фотоядерных реакций относительно невелики.

В ряде научных центров ведутся разработки проектов по использованию ускорителей электронов для производства широко используемых радионуклидов.

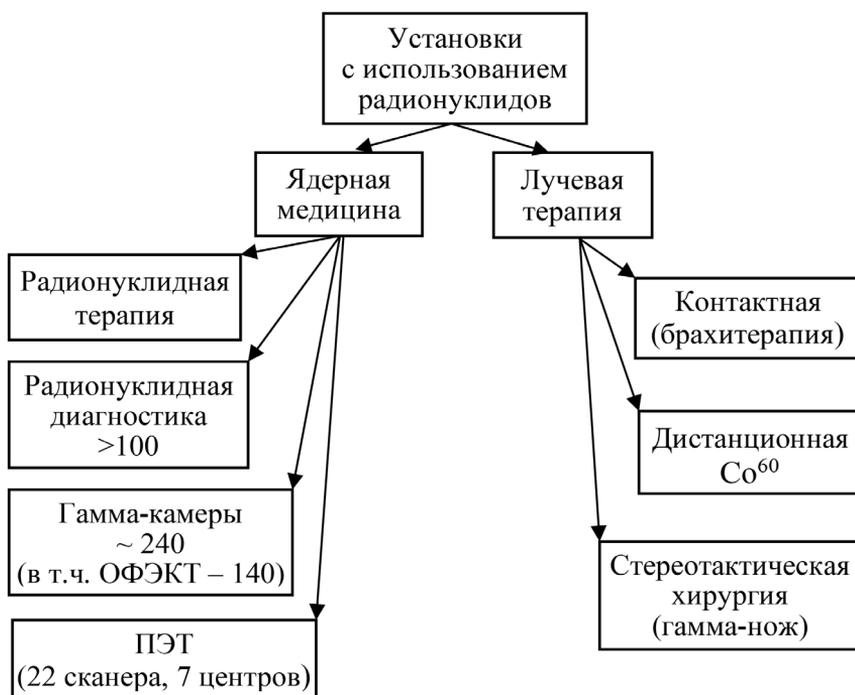
На линейном ускорителе электронов ЛУЭ50 с энергией 50 МэВ, который является инжектором синхротрона, в Национальной научной лаборатории им. А. И. Алиханяна в Армении проведен эксперимент, продемонстрировавший принципиальную возможность наработки изотопа  $^{99m}\text{Tc}$  для медицинских целей. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования возможности развития технологии наработки медицинских изотопов на линейном ускорителе электронов. В результате опытной наработки получен выход изотопа  $^{99m}\text{Tc}$  с активностью 3000 Бк/мг·μА ч. Проводятся работы по созданию промышленного варианта установки для организации полномасштабного производства изотопов на основе разработанной технологии.

В Харьковском физико-техническом институте проведены моделирование и экспериментальные исследования, которые показали, что использование фотоядерных реакций позволяет обеспечить более высокий выход изотопа  $^{47}\text{Sc}$  в мишени из природного  $\text{Ti}$  по сравнению с циклотронным. Фотоядерная наработка  $^{111}\text{In}$  в мишенях на основе  $^{112}\text{Sn}$  (0.97%) также обеспечивает больший выход по сравнению с циклотронным при использовании мишеней из  $^{111}\text{Cd}$

(12.8%) или  $^{109}\text{Ag}$  (48.2%). Фотоядерным методом также можно эффективно нарабатывать изотопы  $^{181}\text{W}$  и  $^{185}\text{W}$ , перспективные в брахитерапии опухолей большого размера.

Одним из перспективных направлений радионуклидной терапии является использование изотопов, испускающих  $\alpha$ -частицы. Они создают уровень облучения клетки, куда они попадают, в несколько тысяч раз чаще, чем в среднем по телу, поскольку обладают относительно высокой (5–8 МэВ) энергией и малой длиной пробега, сравнимой с размером клетки.  $\alpha$ -Частицы обладают высоким значением линейных потерь энергии, что существенно ограничивает возможность опухолевых клеток к восстановлению. Около 100 изотопов испускают  $\alpha$ -частицы. Среди них наибольшее внимание ученых и медиков привлекают  $^{211}\text{At}$ ,  $^{82}\text{Rb}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{213}\text{Bi}$ .

При радионуклидной терапии (РНТ) органы и ткани дозу получают не от внешних источников, как, например, рентгеновский аппарат, а от внутренних. При этом доза выше, чем в случае диагностики с использованием радионуклидов, и существенно выше, чем в рентгеновской диагностике. Эффективная доза в результате обследования зависит от количества радиоактивного вещества, введенного в организм, а также от скорости его распределения и выведения



**Рис. 4.31.** Установки на основе радионуклидов, действующие в медицинских центрах России

из организма. На нее влияют физические свойства радиофармпрепарата, в состав которого входит радионуклид. Еще одним важным требованием к РФП, используемым в терапии, является отсутствие химической токсичности, стерильность, надежность закрепления радиоактивной метки в молекулах препарата. Большую роль играет выбор радионуклидов с небольшим периодом полураспада, чтобы снизить лучевую нагрузку на здоровые ткани. Несмотря на то, что радионуклидов, подходящих по физическим характеристикам, для РНТ много, их использование сдерживается подбором биохимических носителей, а также учетом перечисленных выше факторов. Фактически РНТ осуществляется на клеточном уровне.

На рис. 4.31 представлены установки и отделения ядерной медицины, действующие на основе радионуклидов у нас в стране.

Таблица 4.6

**Примеры радионуклидов, используемых в диагностических целях**

Радионуклид	$T_{1/2}$	Энергия $\beta$ -излучения или $\gamma$ -квантов, МэВ
$^{81m}\text{Kr}$	13 с	0.19
$^{81}\text{Rb}$	4.6 ч	0.19
$^{85}\text{Sr}$	64.8 сут	0.514
$^{95}\text{Tc}$	20 ч	0.766
$^{97m}\text{Tc}$	89 сут	0.965
$^{99m}\text{Tc}$	6 ч	0.141
$^{111}\text{In}$	2.8 сут	0.171
$^{113m}\text{In}$	99.5 мин	0.392
$^{67}\text{Ga}$	61.8 ч	0.185
$^{75}\text{Se}$	120 сут	0.136
$^{199}\text{Tl}$	7.4 ч	0.455
$^{201}\text{Tl}$	72.9 ч	0.167
$^{123}\text{I}$	13.3 ч	0.159
$^{131}\text{I}$	8.1 сут	0.365
$^{132}\text{I}$	2.3 ч	0.668
$^{127}\text{Xe}$	36.4 сут	0.203
$^{133}\text{Xe}$	5.3 сут	0.081
$^{51}\text{Cr}$	27.7 сут	0.32
$^{57}\text{Co}$	267 сут	0.122
$^{62}\text{Cu}$	9.7 мин	1.173

Таблица 4.7

## Примеры изотопов для радионуклидной терапии

Радионуклид	$T_{1/2}$	Тип распада	Средняя энергия $\beta$ -излучения и энергии наиболее интенсивных $\alpha$ - и $\gamma$ -излучений, МэВ
$^{32}\text{P}$	14.3 сут.	$\beta^-$	0.6952
$^{67}\text{Cu}$	61.8 ч	$\beta^-$	0.1475; $\gamma$ 0.1846
$^{77}\text{Br}$	56 ч	$\text{ЭЗ}; \beta^+$	$\gamma$ 0.239; 0.521
$^{90}\text{Y}$	64.3 ч	$\beta^-$	0.928
$^{89}\text{Sr}$	50.6 сут.	$\beta^-$	0.583
$^{111}\text{In}$	2.8 сут.	$\text{ЭЗ}$	$\gamma$ 0.1713; 0.2454
$^{117\text{m}}\text{Sn}$	13.6 сут.	ИП	$\gamma$ 0.1586
$^{124}\text{I}$	4.2 сут.	$\text{ЭЗ}; \beta^+$	$\gamma$ 0.6027; 1.691
$^{125}\text{I}$	60 сут.	$\text{ЭЗ}$	$\gamma$ 0.0355
$^{131}\text{I}$	8.1 сут	$\beta^-$	0.1914; $\gamma$ 0.3645
$^{149}\text{Tb}$	4.2 ч	$\text{ЭЗ}; \beta^+; \alpha$	$\alpha$ 3.967; $\gamma$ 0.165; 0.3623
$^{153}\text{Sm}$	46.7 ч	$\beta^-$	0.2232; $\gamma$ 0.1032
$^{166}\text{Ho}$	26.8 ч	$\beta^-$	0,668; 1,850; $\gamma$ 0,0806
$^{169}\text{Er}$	9.4 сут.	$\beta^-$	0.0991
$^{177}\text{Lu}$	6.7 сут.	$\beta^-$	0.1368; $\gamma$ 0.2884
$^{186}\text{Re}$	90.6 сут.	$\beta^-; \text{ЭЗ}$	0.342; $\gamma$ 0.1372
$^{188}\text{Re}$	16.9 ч	$\beta^-$	0.7539; $\gamma$ 0.155
$^{212}\text{Bi}$	60.6 мин	$\beta^-; \alpha$	0.665; $\alpha$ 6.054; $\gamma$ 0.7273
$^{211}\text{At}$	7.2 ч	$\alpha$	$\alpha$ 5.870; $\gamma$ 0.0687

# Приложение 1

Таблица П1

Универсальные физические постоянные

Название	Обозначение	Величина
Элементарный заряд	$e$	$1.60217657 \cdot 10^{-19}$ Кл = $= 4.8032045 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ
Скорость света в вакууме	$e^2$	$1.44 \cdot 10^{-13}$ МэВ·см = $= 1.44$ МэВ·Фм
	$c$	$2.997925 \cdot 10^8$ м·с <sup>-1</sup>
Гравитационная постоянная	$G$	$6.6734 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> ·кг <sup>-1</sup> ·с <sup>-2</sup>
Постоянная Планка	$h$	$6.6260696 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $= 4.135669 \cdot 10^{-21}$ МэВ·с
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1.0545727 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $= 6.582122 \cdot 10^{-22}$ МэВ·с
Число Авогадро	$NA$	$6.0221413 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Масса покоя электрона	$m_e$	$5.48579903 \cdot 10^{-4}$ а.е.м. = $= 9.109383 \cdot 10^{-31}$ кг = 510.9989 КэВ/с <sup>2</sup>
Масса покоя протона	$m_p$	$1.007276470$ а.е.м. = $= 1.672623 \cdot 10^{-27}$ кг = 938.2720 МэВ/с <sup>2</sup>
Масса покоя дейтрона	$m_d$	$1875.61286$ МэВ/с <sup>2</sup>
Масса покоя нейтрона	$m_n$	$1.008664904$ а.е.м. = $= 1.674929 \cdot 10^{-27}$ кг = 939.5656 МэВ/с <sup>2</sup>
Масса атома водорода	$m_H$	$1.007825035$ а.е.м. = $= 1.673534 \cdot 10^{-27}$ кг = 938.7833 МэВ/с <sup>2</sup>
Относительный заряд электрона	$\frac{e}{m_e}$	$1.75881962 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Относительный заряд протона	$\frac{e}{m_p}$	$9.5788309 \cdot 10^7$ Кл/кг
Классический радиус электрона	$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$	$2.817938 \cdot 10^{-15} = 2.818$ Фм

Название	Обозначение	Величина
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8.854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$12.566370614 \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Радиус первой борховской орбиты	$a_0 = \frac{e^2}{\hbar c}$	$5.29177249 \cdot 10^{-11}$ м $\approx$ 52 918 Фм
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$	$0.007729735308 = \frac{1}{137.0359895}$
Атомная единица массы	1 а.е.м.	931.49432 МэВ = $= 1.6605402 \cdot 10^{-27}$ кг
Энергия	$E$	1 эВ = $1.60217733 \cdot 10^{-19}$ эрг = $= 1.7826627 \cdot 10^{-36}$ кг · с <sup>2</sup>

Таблица П2

Плотность некоторых веществ

Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Алюминий	2700	Кобальт	8600
Антрацен	1250	Медь	8930
Бетон	2200–2350	Парафин СН <sub>2</sub>	890
Вода	1000	Свинец	11300
Воздух	1.293	Серебро	10500
Вольфрам	19300	Стекло	2400–2600
Графит	1600	Тяжелая вода D <sub>2</sub> O	1100
Железо, сталь	7100–7900	Уран	18700
Железо чистое	7870	Фосфор	2200
Золото	19320	Чугун	7200
Кадмий	8640	NaCl	4040

Таблица П3

Состав мягкой биологической ткани

Элемент	Масс., %	Элемент	Масс., %
Водород	10	Кислород	74
Азот	4	Углерод	12

Соотношения между единицами измерения активности и дозы характеристик поля излучения в СИ и внесистемными единицами

Величина и ее символ	Обозначения единиц		Связь между единицами
	внесистемная единица	единица в СИ	
Активность А	1 Ки	1 Бк	1 Бк = 1 расп./с 1 Ки = $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк 1 Бк = $2.703 \cdot 10^{-11}$ Ки
Плотность потока I или тока $J_1$ энергии частиц	1 эрг/(см <sup>2</sup> ·с) 1 МэВ/(см <sup>2</sup> ·с)	1 Вт/м <sup>2</sup>	$1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = 10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2$ 1 Вт/м <sup>2</sup> = = $10^3$ эрг/(см <sup>2</sup> ·с) 1 МэВ/(см <sup>2</sup> ·с) = = $1.6 \cdot 10^{-9}$ Вт/м <sup>2</sup> 1 Вт/м <sup>2</sup> = = $6.25 \cdot 10^8$ МэВ/(см <sup>2</sup> ·с)
Поглощенная доза D	1 рад	1 Гр	1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад 1 рад = $10^{-2}$ Гр
Мощность поглощенной дозы P	1 рад/с	1 Гр/с	1 Гр/с = 100 рад/с 1 рад/с = $10^{-2}$ Гр/с
Эквивалентная доза $D_{\text{эв}}$	1 бэр	1 Зв	1 Зв = 1 Гр/К = 100 бэр 1 бэр = $10^{-2}$ Зв
Мощность эквивалентной дозы $P_{\text{эв}}$	1 бэр/с	1 Зв/с	1 Зв/с = 100 бэр/с 1 бэр/с = $10^{-2}$ Зв/с
Экспозиционная доза $D_{\text{экс}}$	1 Р	1 Кл/кг	1 Кл/кг = $3.88 \cdot 10^3$ Р 1 Р = $2.58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Мощность экспозиционной дозы $P_{\text{экс}}$	1 Р/с	1 А/кг	1 А/кг = $3.88 \cdot 10^3$ Р/с 1 Р/с = $2.58 \cdot 10^{-4}$ А/кг
Керма К	1 рад	1 Дж/кг	1 Дж/кг = 100 рад 1 рад = $10^{-2}$ Дж/кг

# Приложение 2

## Нобелевские премии ученым — создателям ускорителей

### 1. Эрнест Лоуренс — Нобелевская премия 1939 года

**«за изобретение и создание циклотрона и за результаты, полученные на нем, особенно в отношении искусственных радиоактивных элементов».**

В 1929 г. американцу Эрнесту Лоуренсу попала на глаза статья норвежского инженера Видероз на немецком языке, в которой обсуждалась схема резонансного линейного ускорителя. Лоуренс понял, что прямолинейную траекторию можно изогнуть в спираль. После коротких расчетов он со своими коллегами приступил к сооружению первого циклического ускорителя, который реализовал в 1931 г.

Размер циклотрона Лоуренса 12.7 см, он сделан из стекла, сургуча и бронзы. Обладал возможностью разгонять протоны до 80 кэВ. Циклотрон представлял собой полый диск, похожий на пустую консервную банку, разрезанный на две раздвинутые относительно друга друг половинки и помещенный в магнитное поле — между двумя постоянными магнитами. В зазор между дуантами подавалось переменное ВЧ-напряжение, частота которого точно совпадала с частотой обращения частиц. Частицы, пролетая зазор первый раз на обороте, приобретают энергию, равную разности потенциалов, и, пока частицы долетают до зазора второй раз на обороте, проходит половина периода ВЧ, поле меняет знак и снова ускоряет частицы.

Таким образом, на каждом обороте частицы приобретали энергию, равную удвоенному потенциалу в зазоре, и ускорялись до требуемой энергии, совершая оборот за оборотом.

После первого циклотрона последовало строительство более серьезных установок на энергию протонов 1 МэВ (с диаметром полюса 11 дюймов) и 5 МэВ (27 дюймов). Последний успешно использовался для различных экспериментов в ядерной физике. Спустя уже несколько лет благодаря раз-



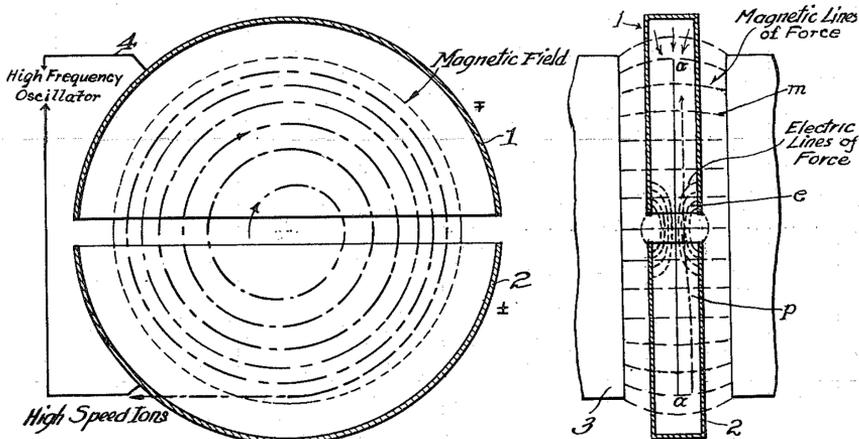


Рис. П. 2.2. Рукописная схема первого циклотрона

вивающимся технологиям в 1936 г. был преодолен рубеж в 8 МэВ, а еще через 10 лет, в 1946 г., был построен большой циклотрон с энергией 200 МэВ.

К сожалению, при таких энергиях скорость циркулирующих частиц становится околосветовой, и без подстройки частоты ВЧ, для того чтобы сохранялся резонанс с частотой обращения частиц, обойтись невозможно. Эту задачу решило уже следующее поколение циклотронов. В 1934 г. на устройство циклотрона был получен патент, а в 1939 г. Лоуренсу была присуждена Нобелевская премия за его выдающееся открытие.

Циклотроны оказались хорошими приборами для экспериментов в ядерной физике. В отличие от частиц, испускаемых ядрами при радиоактивном распаде, пучок частиц, выводимых из циклотрона, был однонаправленным, их энергию можно было регулировать, а интенсивность потока была несравненно выше, чем от любого радиоактивного источника.

Высокие энергии, достигнутые Лоуренсом и его сотрудниками, открыли перед физиками обширное новое поле для исследований. Бомбардировка атомов многих элементов позволила расщепить их ядра на фрагменты, которые оказались изотопами, часто радиоактивными. Иногда ускоренные частицы «прилипали» к ядрам-мишеням или вызывали ядерные реакции, среди продуктов которых



Рис. П. 2.1. Эрнест Лоуренс

встречались новые элементы, не существующие на Земле в естественных условиях. Полученные результаты показали, что если бы частицы можно было ускорять до достаточно больших энергий, то с помощью циклотрона можно было бы осуществить почти любую ядерную реакцию. Циклотрон использовался и для измерения энергий связи многих ядер, и (путем сравнения разности масс до и после ядерной реакции) для проверки соотношения Альберта Эйнштейна между массой и энергией.

Циклотрон позволил создать радиоактивные изотопы для медицинских целей. Над биомедицинским применением ядерной физики Лоуренс работал вместе со своим младшим братом Джоном, медиком и директором Биофизической лаборатории в Беркли. Джон Лоуренс с успехом использовал изотопы для лечения раковых больных.

Эрнест Орландо Лоуренс родился в 1901 г. в Кантоне (штат Южная Дакота). Родители эмигрировали в Соединенные Штаты из Норвегии. Отец был управляющим местных школ, а затем — образованием всего штата и президентом нескольких учительских колледжей; мать тоже работала в системе образования.

Когда один из его двоюродных братьев умер от лейкемии, Лоуренс решил стать медиком. Получив стипендию, он в 1918 г. поступил в колледж св. Олафа в Нортфилде (штат Миннесота), но через год перешел в университет Южной Дакоты. Там профессор электротехники Льюис Э. Эйкели привлек его к углубленным занятиям физикой.

В 1922 г. получил диплом бакалавра с отличием и поступил в аспирантуру университета штата Миннесота. Занимался экспериментальным исследованием электрической индукции и в 1923 г. получил ученую степень магистра наук. Его интерес к физике возрос после встреч с Нильсом Бором, Артуром Комптоном, Альбертом Майкельсоном, Х. А. Вильсоном.

В 1924 г. Лоуренс перешел в Йельский университет, где получил докторскую степень. Диссертация о фотоэлектрическом эффекте в парах калия стала первой из его значительных работ в этой области физики. В Йеле в 1927 г. он получил назначение на должность ассистент-профессора физики, а в 1928 г. стал адъюнкт-профессором Калифорнийского университета в Беркли.

После окончания войны Лоуренс активно продвигал в правительстве крупные и дорогостоящие научные проекты. Он участвовал в создании нескольких крупных ускорителей, в частности, в 1946 г. 184-дюймового синхроциклотрона, ускорившего ионы дейтерия до 195 МэВ. В 1957 г. получил премию Энрико Ферми. Эрнест Лоуренс умер в 1958 г. в Пало-Алто, Калифорния.

В том же 1958 г. в честь Лоуренса были названы две национальные лаборатории: Ливерморская национальная лаборатория и Национальная лаборатория в Беркли (LBNL). С 1959 г. учреждена премия Эрнеста Орландо Лоуренса. В 1961 г. 103-й химический элемент, открытый в лаборатории LBNL, был назван лоуренсием.

В 1973 г. Международный астрономический союз присвоил имя Эрнеста Лоуренса кратеру на видимой стороне Луны.

**2. Джон Кокрофт и Эрнест Уолтон — авторы каскадного ускорителя, Нобелевская премия 1951 года «за пионерскую работу по трансмутации атомных ядер с помощью искусственно ускоренных атомных частиц»**

Многие ученые и в Европе, и в Соединенных Штатах наперегонки стремились добиться большего ускорения частиц, используя два различных подхода. В так называемом прямом методе энергия получалась с помощью единичного высоковольтного электрического импульса.

Вдохновленный теориями физика русского происхождения Георгия Гамова, Джон Кокрофт решил развить данный метод. Гамов, используя квантовую механику, подсчитал, что, поскольку субатомные частицы обладают волновыми свойствами, они время от времени смогут проникать сквозь ядерный барьер, даже когда их энергии не хватает для его преодоления. Уравнения Гамова объясняли, как  $\alpha$ -частицы могут покидать ядра радиоактивных элементов; однако Кокрофт понял, что те же принципы позволяют другим частицам проникать в ядро с помощью энергии, существенно меньшей, чем считалось ранее.

С Эрнестом Уолтоном, коллегой по Кавендишской лаборатории, Кокрофт разработал основанную на прямом методе установку, способную подавать напряжение 600 кВ к трубке, содержащей водород. С помощью этой установки Кокрофт и Уолтон в апреле 1932 г. бомбардировали литий ядрами водорода. «Почти сразу же, — вспоминал потом Кокрофт, — при энергии в 125 кВ доктор Уолтон увидел ядерную сцинтилляцию, характерную для  $\alpha$ -частиц». Они превратили литий и водород в гелий, став тем самым первыми учеными, которым удалось искусственно расщепить атом. Их достижение послужило также экс-



**Рис. П. 2.3.** Джон Кокрофт, Эрнест Резерфорд и Эрнест Уолтон

периментальным подтверждением теории Гамова и показало, что количество энергии, освобождающейся при превращениях атомов, соответствует основному уравнению теории относительности Эйнштейна:  $E = mc^2$ .

В 1930-х годах Кокрофт продолжал свои эксперименты, используя разные частицы и атомные ядра, такие

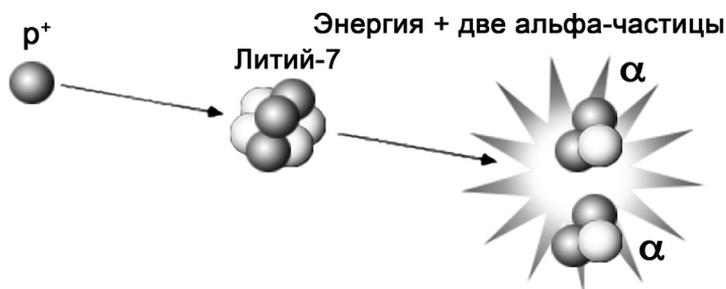


Рис. П. 2.4. Схема распада лития при его бомбардировании протонами

как бор и фтор. После открытия искусственных радиоактивных элементов Кокрофт и Уолтон показали, что они могут также получать такие элементы, облучая бор и углерод ядрами водорода. В 1951 г. ученые получили Нобелевскую премию по физике «за работы по трансмутации атомных ядер с помощью искусственно ускоренных атомных частиц».

Джон Дуглас Кокрофт родился в 1897 г. в Тодмордене, Йоркшир. Его отец был владельцем небольшой хлопкопрядильной фабрики, и трое из его братьев пошли по стопам отца, поскольку их семья занималась этим бизнесом уже пять поколений. Однако Джон, блестящий ученик и спортсмен, получил в 1914 г. стипендию для обучения в Манчестерском университете.

В 1915 г., после года занятий в университете, Джон Кокрофт вступил в добровольческое формирование Ассоциации молодых христиан. На военную службу его призвали в этом же году. До своего выхода в запас в 1918 г. он воевал на Западном фронте и продвинулся по службе от сигнальщика до офицера Королевской полевой артиллерии.

Вернувшись в Манчестер, он стал заниматься электротехникой, и за эти работы получил степень магистра в 1922 г. Став в дальнейшем стипендиатом по математике колледжа св. Джона в Кембридже, он получил там степень бакалавра с отличием в 1924 г. и поступил в кембриджскую Кавендишскую лабораторию младшим ассистентом-исследователем. Четыре года спустя он получил докторскую степень. В Кембридже он читал лекции по физике и занимался математическими и техническими разработками. Совместно с русским физиком Петром Капицей он разработал трансформаторные обмотки для получения интенсивных магнитных полей.

Начиная с 1928 г. Кокрофт работал совместно с Эрнестом Уолтоном над ускорением протонов. В 1932 г. они бомбардировали литий пучком высокоэнергетических протонов и превратили его в гелий и другие химические элементы. Это было первое в мире успешное искусственное превращение (трансмутация) химических элементов.

С началом Второй мировой войны Кокрофт занимает пост заместителя директора научных исследований в министерстве тыла и работает над радаром.

В 1944 г. участвует в канадском проекте по атомной энергии и становится директором лаборатории. В 1946 г. Кокрофт возвращается в Британию чтобы основать учреждение по исследованиям атомной энергии (AERE), которое ведет британскую атомную программу. Назначен первым директором AERE. После ухода с поста директора продолжает участвовать в атомной программе.

В 1944 г. Джон Кокрофт был посвящен в командоры британской империи, стал рыцарем в 1948 г. и посвящен в рыцари-командоры Бани в 1953 г.

В 1944 г. получил Медаль и премию Резерфорда. В 1951 г. был удостоен Нобелевской премии по физике совместно с Эрнстом Уолтоном за исследования по трансмутации атомных ядер.

В 1959 г. он становится первым мастером Колледжа Черчилля в Кембриджском университете. Был президентом Института физики (1954–1956), Физического общества (1960–1962) и Британской ассоциации содействия науке. Кокрофт служил канцлером Австралийского национального университета с 1961 по 1965 г.

В честь Кокрофта названо здание в Кембриджском университете, содержащее лекционный зал и несколько лабораторий. Самое старое здание в Исследовательской школе физических наук и конструирования Австралийского национального университета также названо в его честь.

В 1970 г. Международный астрономический союз присвоил имя Джона Кокрофта кратеру на обратной стороне Луны.

В 2006 г. в Великобритании при Манчестерском университете был открыт институт Кокрофта. Здесь ведутся исследования в области ускорительной физики и ускорительных технологий.

Джон Дуглас Кокрофт умер 18 сентября 1967 г. в Кембридже.

Эрнест Томас Синтон Уолтон, ирландский физик, родился в Дангарване в 1903 г. (графство Уотерфорд) в семье священника методистской церкви Джона Артура Уолтона и Анны Элизабет. Юный Уолтон получил образование в школах Бэнбриджа и Кукстауна. В 1915 г. он поступил в Методистский колледж в Белфасте и окончил его в 1922 г. Затем он поступил в Тринити-колледж при Дублинском университете, где получил степень бакалавра в 1926 г. Он остался в Тринити-колледже еще на год для экспериментальной и теоретической работы по турбулентности жидкости и получил степень магистра в 1927 г.

В этом же году Уолтон получил правительственную стипендию для изучения ядерной физики и был принят в аспирантуру в Кавендишскую лабораторию Кембриджского университета, где под руководством Эрнеста Резерфорда защитил докторскую диссертацию в 1931 г. и проработал исследователем в Кембридже до 1934 г.

В 1934 г. Эрнест Уолтон вернулся в Ирландию и стал членом совета физического факультета Тринити-колледжа в Дублине. В 1946 г. он был назначен

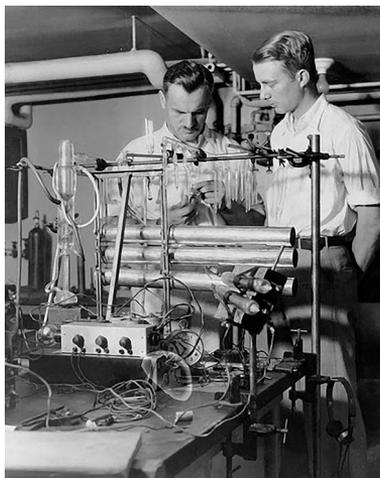
профессором естествознания и экспериментальной философии Тринити-колледжа.

Уолтон и Кокрофт получили медаль Хьюза Лондонского королевского общества в 1938 г. В более поздние годы, и преимущественно после выхода на пенсию в 1974 г., Уолтон получил множество почетных степеней и наград от различных университетов и институтов мира.

Умер 25 июня 1995 г. в Белфасте.

**3. Луис Уолтер Альварес — создатель линейного ускорителя, Нобелевская премия 1968 года «за убедительный вклад в физику элементарных частиц, в частности за открытие большого количества резонансных состояний, ставшее возможным в связи с его разработками методик использования пузырьковой камеры и анализа данных»**

Для исследования множества элементарных частиц, образующихся в новых ускорителях, необходимо регистрировать их следы, или треки. Первым прибором, позволявшим осуществлять такую регистрацию, была ионизационная камера, изобретенная в 1911 г. Ч.Т.Р. Вильсоном. Когда Вильсон расширял и тем самым охлаждал перенасыщенный пар в своей камере, атомные частицы, пролетая через нее, оставляли за собой следы из капелек жидкости, которые можно было сфотографировать. Дальнейшие продвижения в области регистрации частиц были сделаны в 1940-е гг., когда Сесил Ф. Пиуэлл разработал фотографические эмульсии, на которых удавалось получать изображение треков непосредственно.



С появлением новых более мощных ускорителей в начале 1950-х гг. эти методы устарели, поскольку образующиеся в таких ускорителях частицы с высокой энергией обладали очень коротким временем жизни и малой длиной треков. Преодолеть эти трудности удалось в 1952 г., когда Доналд А. Глазер изобрел пузырьковую камеру, в которой частицы, пролегая через перегретую (нагретую выше температуры кипения) жидкость, оставляли след из пузырьков газа.

Познакомившись с работой Глазера на конференции в 1953 г., Луис Альварес значительно усовершенствовал пузырьковую камеру, используя в качестве жидкости жидкий водород. В течение следующих пяти лет была создана целая серия возраставших в диаметре камер: от 1-дюймовой до 72-дюймовой,

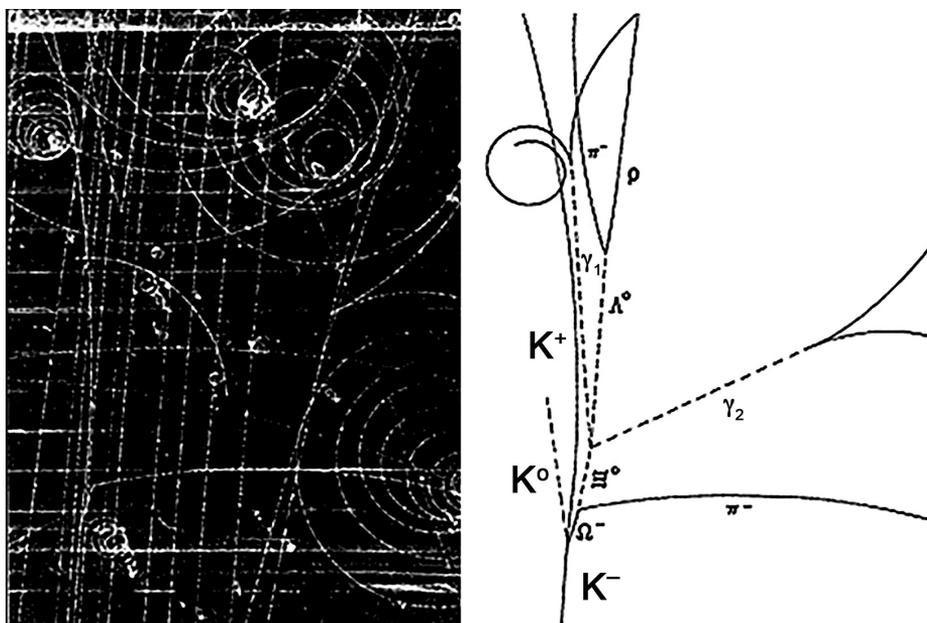


Рис. П. 2.6. Треки частиц, регистрируемых в пузырьковой камере

построенной в 1959 г. В 1960 г. впервые многие новые элементарные частицы наблюдались в Беркли.

Чтобы фотографировать треки таких частиц, коллега Альвареса Джек Франк создал вращающуюся стереографическую систему. Она начала действовать в 1957 г., затем многократно использовалась специалистами, занимавшимися физикой высоких энергий. Чтобы проанализировать миллионы фотографий, снимавшихся ежегодно на этих установках, Альварес и его коллеги применяли компьютеры.

В конце 1950-х гг. они разработали хитроумные компьютерные программы, позволявшие сортировать и анализировать данные с беспрецедентными скоростью и точностью. В результате подобных исследований к началу 1960-х гг. число известных частиц возросло приблизительно с 30 до более чем 100. Многие из них были «резонансами» — короткоживущими частицами, которые нельзя наблюдать непосредственно, но чье существование проявляется во внезапном увеличении числа других частиц, возникающих при определенной энергии. Почти все резонансы были открыты либо самим Альваресом, либо его коллегами, либо другими учеными, использовавшими его пузырьковую камеру и аналитическую технику.

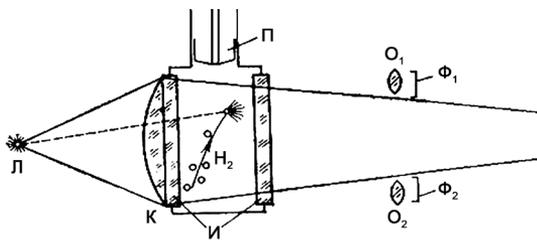
В 1968 г. Луису Альваресу была присуждена Нобелевская премия.

Американский физик Луис Уолтер Альварес родился в Сан-Франциско (штат Калифорния) в 1911 г. Его мать — Харриет Скидмор (в девичестве

Смит), отец — Уолтер Клемент Альварес — профессор Калифорнийского университета, врач и журналист, освещавший медицинские темы. В 1926 г. семья переехала в Рочестер (штат Миннесота). В 1928 г. Альварес окончил школу и поступил в Чикагский университет. Окончив университет с отличием в 1932 г., он остался в Чикаго для дальнейшего обучения, стал магистром в 1934 г. и доктором в 1936 г.

Вернувшись в Калифорнию в 1936 г., он занялся исследованиями в области ядерной физики. Был ассистентом-исследователем, преподавателем (1938), профессором (1945). В конце 1930-х гг. он вместе с Джекобом Х. Вайенсом на циклотроне в Беркли получил искусственный изотоп ртути с атомным весом 198. В 1937 г. он экспериментально доказал, что ядро атома может захватывать некоторые электроны, расположенные на самых близких к ядру орбитах этого атома (*K*-захват). Разработанный им метод получения пучков очень медленных нейтронов открыл путь к фундаментальным исследованиям рассеяния нейтронов и позволил впервые измерить магнитный момент нейтрона. Незадолго до начала Второй мировой войны Альварес с одним из своих коллег открыл тритий (радиоактивный изотоп водорода) и гелий-3 (изотоп, играющий важную роль в физике низких температур).

Во время Второй мировой войны он участвовал в разработке ядерной бомбы («Манхэттенский проект»), позже исследовал последствия ее применения в Хиросиме. После окончания войны, в 1946 г., построил первый линейный ускоритель протонов с трубками дрейфа. Позже Альварес создал первую большую пузырьковую камеру и разработал современную методику работы с такими устройствами, что сделало их пригодными для количественного исследования элементарных частиц. В частности, под его руководством была реализована водородная пузырьковая камера и получены миллионы снимков



**Рис. П. 2.7.** Схема водородной пузырьковой камеры: корпус камеры заполнен жидким водородом ( $H_2$ ); расширение производится с помощью поршня П; освещение камеры на просвет осуществляется импульсным источником света Л через стеклянные иллюминаторы И и конденсатор К; свет, рассеянный пузырьками, фиксируется с помощью фотографических объективов  $O_1$  и  $O_2$  на фотопленках  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$

взаимодействий частиц. Что касается методики, то на ее основе, начиная с 1955 г., был осуществлен большой цикл исследований, приведший к открытию в 1960 г. короткоживущих нестабильных частиц — так называемых резонансов. Эта работа в 1968 г. была удостоена Нобелевской премии по физике.

Вместе с большим коллективом исследо-

## Приложения

вателей в 1956 г. Альварес обнаружил новую элементарную частицу — сигма-нуль-гиперон. В 1955–1956 гг. им было экспериментально доказано, что  $\tau$ - и  $\theta$ -мезоны имеют приблизительно равные массы и времена жизни, что говорит об идентичности этих частиц. В 1956 г. Альварес открыл важное явление мюонного катализа, а в 1961 г. — еще одну частицу,  $\omega$ -омега-мезон.

В 1954–1959 и 1976–1978 гг. занимал должность заместителя директора Радиационной лаборатории имени Э. О. Лоуренса в Беркли. В 1969 г. Альварес был избран президентом Американского физического общества.

Умер в 1 сентября 1988 г. в Беркли.

# Приложение 3

## Нобелевские лауреаты по физике за открытия, сделанные в области физики ядра и элементарных частиц

Год	Лауреат	Вклад
1901	В. Рентген	открытие X-лучей, названных впоследствии его именем
1902	Г. Лоренц, П. Зеeman	исследования влияния магнетизма на излучение
1903	А. Беккерель П. Кюри, М. Кюри- Склодовская	открытие радиоактивности, исследование радиоактивности
1904	Дж. Релей	исследования плотностей наиболее важных газов и открытие в связи с этими исследованиями аргона
1905	Ф. Ленард	работы по катодным лучам
1906	Дж.Дж. Томсон	большие заслуги в теоретических и экспериментальных исследованиях электрической проводимости газов
1907	А. Майкельсон	прецизионные оптические приборы, спектроскопические и метрологические исследования, выполненные с их помощью
1911	В. Вин	открытие законов теплового излучения
1914	М. фон Лауэ	открытие дифракции X-лучей кристаллами
1915	В.Г. Брэгг, В.Л. Брэгг	работы по анализу кристаллической структуры с помощью X-лучей
1917	Ч. Баркла	открытие характеристического рентгеновского излучения элементов
1918	М. Планк	открытие кванта энергии
1919	И. Штарк	открытие эффекта Допплера в канальных лучах и расщепление спектральных линий в электрических полях
1921	А. Эйнштейн	вклад в теоретическую физику и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта

Приложения

Год	Лауреат	Вклад
1922	Н. Бор	работы по исследованию структуры атомов и их излучения
1923	Р. Милликен	работы по элементарному электрическому заряду и фотоэлектрическому эффекту
1924	К. Зигбан	открытия и исследования в области рентгеновской спектроскопии
1925	Дж. Франк, Г. Герц	открытие законов столкновения электрона с атомом
1927	А. Комптон, Ч. Вильсон	открытие эффекта Комптона, открытие метода, делающего видимыми траектории заряженных частиц с помощью конденсации пара
1929	Л. де Бройль	открытие волновой природы электрона
1930	Ч. Раман	работы по рассеянию света, открытие эффекта Рамана
1932	В. Гейзенберг	создание квантовой механики
1933	Э. Шредингер, П. Дирак	открытие новых плодотворных формулировок атомной теории
1935	Дж. Чедвик	открытие нейтрона
1936	В. Гесс, К. Андерсон	открытие космического излучения, открытие позитрона
1937	К. Дэвиссон, Дж. П. Томсон	экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах
1938	Э. Ферми	демонстрация существования новых радиоактивных элементов, полученных с помощью нейтронного облучения, открытие реакций, вызванных медленными нейтронами
1939	Э. Лоуренс	изобретение и создание циклотрона, результаты, полученные на нем, в особенности связанные с искусственными радиоактивными элементами
1943	О. Штерн	вклад в развитие метода молекулярных пучков, открытие магнитного момента протона
1944	И. Раби	резонансный метод для измерения магнитных свойств атомных ядер
1945	В. Паули	открытие принципа Паули
1948	П. Блэккет	создание метода камеры Вильсона; открытия, сделанные в связи с этим в области ядерной физики и космических лучей

Год	Лауреат	Вклад
1949	Х. Юкава	предсказание существования мезонов на основе теоретических работ по ядерным силам
1950	С. Пауэлл	создание фотографического метода; открытия, связанные с мезонами, сделанные с помощью этого метода
1951	Дж. Кокрофт, Э. Уолтон	пионерскую работа по трансмутации атомных ядер с помощью ускоренных атомных частиц
1952	Ф. Блох, Э. Парселл	создание новых методов точных ядерных магнитных измерений и связанные с ними открытия
1954	М. Борн, В. Боте	фундаментальные исследования в квантовой механике, в особенности за статистическую интерпретацию волновой функции; метод совпадений и сделанные с его помощью открытия
1955	В. Ламб, П. Каш	открытия, связанные с тонкой структурой спектра водорода; прецизионное определение магнитного момента электрона
1957	Янг Чжэньнин, Ли Чжэндао	глубокие исследования законов четности, которые привели к важным открытиям в области элементарных частиц
1958	П. Черенков, И. Франк, И. Тамм	открытие и интерпретация эффекта Черенкова
1959	Э. Сегре, О. Чемберлен	открытие антипротона
1960	Э. Сегре О. Чемберлен	изобретение пузырьковой камеры
1961	Р. Хофштадтер, Р. Мёссбауэр	пионерские исследования рассеяния электронов атомными ядрами и открытия, связанные со структурой нуклона; исследования в области резонансного поглощения $\gamma$ -излучения и открытие эффекта Мёссбауэра
1963	Э. Вигнер М. Гёпперт-Майер, Х. Йенсен	вклад в теорию атомного ядра и элементарных частиц, в частности открытие и применение фундаментальных принципов симметрии; открытия в области ядерной модели оболочек
1964	Ч. Таунс, Н. Басов, А. Прохоров	фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию осцилляторов и усилителей, основанных на лазерно-мазерном принципе

Приложения

Год	Лауреат	Вклад
1965	С. Томонага, Дж. Швингер, Р. Фейнман	фундаментальные работы в области квантовой теории поля с далеко идущими последствиями для физики элементарных частиц
1967	Х. Бете	вклад в теорию ядерных реакций, особенно открытие источника энергии звезд
1968	Л. Альварес	убедительный вклад в физику элементарных частиц, в частности открытие большого количества резонансных состояний, ставшее возможным в связи с его разработками методик использования пузырьковой камеры и анализа данных
1969	М. Гелл-Манн	вклад и открытия в классификации элементарных частиц и их взаимодействий
1975	О. Бор Б. Моттelson Дж. Рейнуотер	открытие связи между коллективным и одно-частичным движением в атомном ядре, создание на базе этого теории структуры атомного ядра
1976	Б. Рихтер С. Тинг	открытие тяжелой элементарной частицы нового типа
1979	Ш. Глэшоу, А. Салам, С. Вайнберг	вклад в теорию объединенного слабого и электромагнитного взаимодействия между элементарными частицами, включающий предсказание слабого нейтрального тока
1980	Дж. Кронин, В. Фитч	открытие нарушения фундаментальных принципов симметрии в распаде нейтральных $K$ -мезонов
1984	К. Руббиа, С. ван дер Мер	решающий вклад в большой проект, который привел к открытию полевых частиц $W$ и $Z$ , переносчиков слабого взаимодействия
1986	Э. Руска, Г. Бинниг, Г. Рорер	фундаментальные работы в электронной оптике; разработка первого электронного микроскопа; изобретение сканирующего туннельного микроскопа
1988	Л. Ледерман, М. Шварц, Дж. Стейнбергер	метод нейтринного пучка; демонстрация дублетной структуры лептонов через открытие мюонного нейтрино
1990	Дж. Фридман, Г. Кендалл, Р. Тейлор	пионерские исследования глубоко неупругого рассеяния электронов на протонах и связанных нейтронах, существенно важных для разработки кварковой модели в физике частиц
1992	Ж. Шарпак	открытие и создание детекторов частиц, в частности многопроволочной пропорциональной камеры

Год	Лауреат	Вклад
1995	М. Перл, Ф. Райнерс	открытие $\tau$ -лептона; детектирование нейтрино
1999	Г. Хоофт, М. Велтман	объяснение квантовой структуры электрослабого взаимодействия
2012	С. Арош, Д. Уайнленд	новаторские экспериментальные методы, позволяющие измерять и контролировать отдельные квантовые частицы
2013	Ф. Энглер, П. Хиггс	теоретическое открытие механизма, который вносит свой вклад в наше понимание происхождения массы субатомных частиц и который недавно был подтвержден открытием предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на БАК в ЦЕРН
2015	Т. Кадзита, А. Макдональд	открытие нейтринных осцилляций, показывающее, что нейтрино имеют массу

**Нобелевские лауреаты по химии за достижения в областях, смежных с ядерной физикой**

Год	Лауреат	Вклад
1908	Э. Резерфорд	исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ
1911	М. Склодовская-Кюри	открытия радия и полония, изучение свойств радия, получение радия в металлическом состоянии, эксперименты, связанные с радием
1914	Т.У. Ричардс	точное определение атомных масс большого числа химических элементов
1921	Ф. Содди	вклад в химию радиоактивных веществ; исследование явления изотопии
1922	Ф. Астон	открытие большого количества стабильных изотопов и изучение их свойств
1934	Г.К. Юри	открытие тяжелого водорода (дейтерия), используемого для получения тяжелой воды — замедлителя в ядерных реакторах и индикатора биохимических реакций живой ткани
1935	Ф. Жолио-Кюри, И. Жолио-Кюри	открытие искусственной радиоактивности и синтез новых радиоактивных элементов
1943	Д. Хевеши	использование изотопов как индикаторов; открытие гафния

Приложения

Год	Лауреат	Вклад
1944	О. Ган	открытие реакции деления ядер урана нейтронами
1951	Э. Макмиллан, Г. Сиборг	открытие плутония
1960	У.Ф. Либби	введение метода использования углерода-14 для определения возраста в археологии, геологии, геофизике и других областях науки
1991	Р. Эрнст	вклад в развитие метода ядерной магнитной резонансной спектроскопии высокого разрешения

**Нобелевские лауреаты по медицине за достижения в областях,  
смежных с ядерной физикой**

Год	Лауреат	Вклад
1946	Г.Д. Мёллер	появление мутаций под влиянием рентгеновского излучения
1979	А. Кормак Г. Хаунсфилд	разработка компьютерной томографии
2003	П. Лотербур П. Мэнсфилд	открытия, касающиеся метода магнитно-резонансной томографии

# Литература

1. *Коломенский А. А.* Физические основы методов ускорения заряженных частиц. Изд-во Моск. ун-та, 1980.
2. *Лебедев А. Н., Шальнов А. В.* Основы физики и техники ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. *Брук Г.* Циклические ускорители заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1970.
4. *Рябухин Ю. С., Шальнов А. В.* Ускоренные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1980.
5. *Широков Ю. М., Юдин Н. П.* Ядерная физика. М.: Наука. 1972.
6. *Мухин К. Н.* Экспериментальная ядерная физика. М.: Энергоатомиздат. 1993.
7. *Пицаев А. К.* Современное состояние радиационной технологии // Успехи химии. 1995. № 64 (6). С. 609–640.
8. *Костылев В. А., Наркевич Б. Я.* Медицинская физика. М.: Медицина, 2008.
9. *Ииханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П.* Частицы и атомные ядра. Изд-во Моск. ун-та, 2005.
10. *Кудрявцев П. С., Конфедератов И. Я.* История физики и техники. М.: Просвещение, 1965.
11. *Абрамов А. И.* История ядерной физики. М.: КомКнига, 2006.
12. *Натт R. W.* Industrial accelerators // Reviews of accelerator science and technology. 2008. V. 1. P. 163.
13. *Бардаханов С. П., Корчагин А. И., Куксанов Н. К. и др.* Применение мощных ускорителей электронов типа ЭЛВ для получения нанопорошков // Problems of atomic science and technology. 2008. № 5, P. 165–168.
14. *Джонс Х.* Физика радиологии. М.: Атомиздат, 1965.
15. *Черняев А. П.* Взаимодействие излучения с веществом. М.: Физматлит, 2004.
16. *Черняев А. П.* Ускорители в современном мире. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013.
17. *Хорошков В. С.* Введение в технику протонной лучевой терапии. М., Изд. НИИЯФ МГУ, 2001.
18. *Бор Н.* Прохождение атомных частиц через вещество / Пер. с англ. М.: ИЛ, 1950.
19. *Стародубцев С. В., Романов А. М.* Прохождение заряженных частиц через вещество. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1962.
20. *Балашов В. В.* Строение вещества. Изд-во Моск. ун-та, 1993.
21. *Меликов Ю. В.* Экспериментальная техника в ядерной физике. Изд-во Моск. ун-та, 1973.
22. *Тернов И. М., Михайлин В. В.* Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1986.
23. *Ииханов Б. С.* Субатомная физика. Вопросы. Задачи. Факты. Изд-во Моск. ун-та, 1994.

24. *Khan F. M.* The Physics of Radiation Therapy. USA, Baltimore, 1992.
25. *Chu W. T., Ludewigt B. A., Renner T. R.* Instrumentation for treatment of cancer using proton and light-ion beams // *Rev. Sci. Instrum.* 1993. V. 64. P. 2055.
26. *Martin J., Berger M. J., Seltzer S. M.* Tables of energy-losses and ranges of electrons and positrons // *NAS-NRC. Publ.* 1133.
27. *Groom D. E., Klein S. R.* Passage of particles through matter // *The European Phys. J. C.* V. 15. P. 163.
28. *Bortfeld T., Schlegel W.* An analytical approximation of depth-dose distributions for therapeutic proton beams // *Phys. Med Biol.* 1996. V. 41. P. 1331.
29. *Кудряшов Ю. Б.* Радиационная биология (ионизирующие излучения). Москва. Физматлит, 2004.
30. *Seltzer S. M.* An assessment of the role of charged secondaries from nonelastic nuclear interaction by therapy proton beam in water. National Institute of Standards and Tehnology Technical Reports No. NISTIR5221, 1993.
31. *Ярмоненко С. П.* Радиобиология человека и животных. М.: Высшая школа, 1988.
32. *Алимов А. С.* Практическое применение электронных ускорителей. Препринт НИИЯФ МГУ № 2011–13/877.
33. *Плющиков В. Г., Семенов О. Г.* Использование ионизирующих излучений в агропромышленном комплексе. Радиационная экспертиза объектов сельскохозяйственного производства. М.: Изд-во РУДН. 2007.
34. *Пишечников К. А., Зейрук В. Н., Еланский С. Н., Мальцев С. В., Прямов С. Б.* Технологии хранения картофеля. М.: Агроспас, 2016.
35. *Joshi M. R., Srirangarajan A. N., Thomas P.* Effects of gamma irradiation and temperature on sugar and vitamin C changes in five Indian potato cultivars during storage // *Food Chem. J.* 1990. V. 35. P. 209.
36. *Todoriki S., Hayashi T.* Sprout inhibition of potatoes with soft-electron (low-energy electron beams) // *J. of the Science of Food and Agricul ture.* 2004. V. 84 (15). P. 2010.
37. *Frazier M. J., Kleinkopf G. E., Brey R. R., Olsen N. L.* Potato sprout inhibition and tuber quality after treatment with high-energy ionizing radiation // *American j. of potato research.* 2006. V. 83 (1). P. 31.
38. *Hayashi T., Todoriki S.* Treatment of Foods with Soft-electrons (Low-energy Electrons). JAERI–Conf. 2002. V. 13.
39. IAEA-TECDOC-1158. Irradiation of fish, Shellfish and frog legs.
40. Общий стандарт на пищевые продукты, обработанные проникающим излучением. CODEX STAN106–1983. REV. 1–2003.
41. Кодекс Алиментариус. Облученные продукты питания. Совместная программа ФАО/ВОЗ по стандартам на пищевые продукты. М.: Весь Мир, 2007.
42. Радиационная стерилизация пищевых продуктов. 2011. <http://gamma-stop.ru/index/sterilizacija/0–32>.

43. *Молин А. А.* Развитие нормативного регулирования и популяризация применений радиационных технологий в области пищевой промышленности // ООО «Объединенная инновационная корпорация». Предприятие Госкорпорации «Росатом». 2012. <http://2012.atomexpo.ru/>
44. *Аксамирский П. В., Куксанов Н. К., Машнин А. Б., Немытов П. И., Салимов Р. А.* Система четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий // *Электротехника*. 1997. № 7. С. 46.
45. *Громов Н. И., Ванькин В. Г., Ройх А. И., Лыщиков С. П., Степанов М. Н., Бублей А. В., Вейс М. Э., Куксанов Н. К., Долгополов В. Е., Лаврухин А. В., Немытов П. И., Салимов Р. А.* Усовершенствованный пром. ускоритель электронов для облучения кабельной изоляции // *Кабели и провода*. 2004. № 4. С. 16.
46. Публичный годовой отчет Корпорации Росатом. Москва. 2011.
47. *Андреева Н. С., Шведунов В. И. и др.* Радиационные технологии: взгляд из России // Ассоциация «РадТех». Москва, 2015.
48. *Огородников С. А., Симочко С. В., Малышенко Ю. В.* Инспекционно-досмотровый комплекс СТ-6035 // *Таможенная политика России на Дальнем Востоке*. 2014. № 1. С. 70.
49. *Ремизов А. Н.* Медицинская и биологическая физика. М.: Высшая школа, 1996.
50. *Черняев А. П.* Физические основы медицинской техники. Изд-во Моск. ун-та, 2007.
51. *Hertz S et al.* Radioactive iodine as an indicator in thyroid physiology // *American j. of physiology*. 1940. P. 565.
52. *Leksell L.* The stereotaxic method and radiosurgery of the brain // *Acta Chir Scand*. 1951. V. 102. P. 316.
53. *Черняев А. П.* Ионизирующие излучения. М.: КДУ, 2014.
54. *Физика визуализации изображений в медицине / Под ред. С. Уэбба.* М.: Мир, 1991. Т. 1.
55. *Марусина М. Я., Казначеева А. О.* Современные виды томографии. СПб.: Ред.-изд. отдел ИТМО, 2006.
56. *Бекман И. Н.* Курс лекций. Ядерная медицина. Изд. хим. ф-та МГУ (каф. радиохимии), 2006.
57. *Санжарова Н. И. и др.* Перспективы использования радиационных технологий в агропромышленном комплексе РФ // *Вестн. РАЕН*. 2014. № 1. С. 78.
58. *Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Под общ. ред. Г. В. Козьмина, С. А. Гераськина, Н. И. Санжаровой.* Москва–Обнинск: Информполиграф, 2015.
59. *Полякова И. В., Кобялко В. О., Саруханов В. Я., Козьмин Г. В., Санжарова Н. И., Лыков И. Н.* Использование  $\gamma$ -излучения для холодной стерилизации многокомпонентных продуктов, готовых к употреблению // *Радиация и риск*. 2015. Т. 24. № 4. С. 43.

*Научно-популярное издание*

Черняев Александр Петрович

**РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**  
Наука. Народное хозяйство. Медицина

Координатор проекта *О. В. Гаврилов*

Редактор *Е. В. Раздобурдина*

Корректоры *Е. В. Раздобурдина, Е. Г. Якимова*

Верстка *М. В. Желтоножская*

Художественное оформление *К. В. Саутенков*

Подписано в печать 26.08.2019. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 14,0. Усл. печ. л. 19,01.

Тираж 500 экз. Изд. № 11367. Заказ № 04193-19.

Издательство Московского университета. 119991, Москва,  
ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15 (ул. Академика Хохлова, 11).  
Тел.: (495) 939-32-91; e-mail: secretary@msupress.com.  
Сайт Издательства МГУ: <http://msupress.com>

Отпечатано по заказу ООО «ОСТ ПАК новые технологии»  
(125319, г. Москва, ул. Академика Ильюшина, д. 16 к. 1) в ОАО  
«Подольская фабрика офсетной печати». 142100, г. Подольск,  
Революционный просп., 80/42. Тел.: 8 (4967) 69-97-22,  
8 (4967) 69-97-29; e-mail: ofset@podolsk.ru