

ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Курс лекций

Лекция 9. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Содержание.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	2
2. ПРИРОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	2
3. ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	3
3.1 Радионуклиды – источники ионизирующих излучений	5
3.2 Источники α -частиц, протонов и атомов отдачи продуктов деления.	9
3.3 Источники электронов	9
3.3.1 Изотопные источники электронов	9
3.3.2 Ускорители электронов	10
3.4 Источники рентгеновского излучения	11
3.4.1 Рентгеновская трубка	11
3.4.2 Лазер.	14
3.4.3 Ускорители	14
3.4.4 Радионуклидные источники рентгеновского излучения	15
3.5 Источники γ -излучения	16
3.5.1 Изотопные гамма-установки	16
3.5.2 Ускорители – источники тормозного излучения	17
3.6 Портативные источники нейтронов	17
3.6.1 Радионуклидные нейтронные источники	17
3.6.2 Генераторы нейтронов.	19
4. УСКОРИТЕЛИ	19
5. ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ	23
5.1 Реакторы – генераторы постоянных потоков нейтронов и гамма-излучения	24
5.2 Импульсные реакторы	24

В науке и технике радионуклиды нашли применение как источники ионизирующего излучения, энергетические источники (тепла или электроэнергии), источники света, ионизаторы воздуха. Источники излучений применяются в таких приборах, как медицинские гамма-терапевтические аппараты, гамма-дефектоскопы, плотномеры, толщиномеры, серомеры, нейтрализаторы статического электричества, радиоизотопные релейные приборы, измерители зольности угля, сигнализаторы обледенения, дозиметрическая аппаратура со встроенными источниками и т.п.

Изотопный ионизатор - ионизатор, основанный на изотопных источниках, например тритиевый, или никелевый (радиоактивный). Принцип построен на альфа, бета, или гамма излучении, в процессе которого воздух ионизируется. Используется для снятия статического электричества и в медицинских целях (ионотерапия).

Ионотерапия - лечение различных заболеваний при помощи ионизаторов. Как правило лечебные дозы концентрации аэроионов больше рекомендуемых профилактических. Помогает при заболеваниях дыхательных путей, открытых ранах, ожогах, и послеоперационном периоде.

Источниками ионизирующего излучения могут быть космические излучения, природные или техногенные радионуклиды, рентгеновские трубки, ускорители электронов, протонов или тяжелых ионов, ядерные реакторы, плазменные термоядерные установки, гамма-лазеры и др. Техническими источниками ионизирующего излучения являются некоторые медицинские приборы (рентгеновский аппарат, диагностические установки на базе использования радиоизотопов, оборудование для лучевой терапии), ядерные взрывы, атомная энергетика,

геологические приборы для поиска полезных ископаемых, предметы, содержащие радиоактивные вещества. Это - часы со светящимся циферблатом, изготовленные с применением радия (или менее опасными тритием или прометием – 147), антистатические щетки для удаления пыли с пластинок и фотопринадлежностей, действие которых основано на испускании α - частиц; детекторы дыма, принцип действия которых основан на использовании α - излучения, цветные телевизоры, испускающие рентгеновское излучение и другие предметы.

В данной лекции мы рассмотрим естественные и техногенные источники ионизирующего излучения (ИИИ). Основное внимание уделим основным типам промышленных устройств: ускорителям, ядерным реакторам, рентгеновским трубкам, а также ИИИ, основанным на использовании радионуклидов, т.е. источникам, применяемым для решения задач радиационной физики и химии, материаловедения, медицины и утилизации радиоактивных отходов.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источником ионизирующего излучения может быть космический объект, земной объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение.

Источник ионизирующего излучения, ИИИ - объект, содержащий радиоактивный материал или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.

В зависимости от происхождения, ИИИ бывают естественные (космические лучи, гамма-излучение от земных пород, продукты распада радона и тория в воздухе и другие природные радионуклиды, присутствующие в окружающей среде) и искусственные (рентгеновское излучение, применяемое в медицине, радиоактивные осадки при использовании ядерного оружия, выбросы радионуклидов с отходами атомной станции в окружающую среду, а также гамма-излучение, используемое в промышленности).

2. ПРИРОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основную часть облучения население Земли получает от **естественных источников** радиации. Это природные радионуклиды, содержащиеся в земной коре, строительных материалах, воздухе, пище и воде, а также космические лучи. В среднем они определяют 80% годовой эффективной дозы, получаемой людьми, в основном вследствие внутреннего облучения. Уровни естественного излучения варьируют в довольно широких пределах, в среднем составляя около 2,4 мЗв в год. Наблюдение за населением отдельных регионов Земли с уровнем естественного фона во много раз превышающем средние значения, не обнаружили каких-либо неблагоприятных влияний на здоровье живущих там людей.

Наиболее вероятные источники галактических **космических лучей** – вспышки сверхновых звезд и образующиеся при этом пульсары. Космические лучи – уникальный естественный источник частиц сверхвысоких энергий, позволяющий изучать процессы взаимодействия элементарных частиц и их структуру.

Многие небесные тела (например, солнечная корона, Луна, поверхность которой бомбардируют частицы высокой энергии, испущенные Солнцем) являются естественными источниками рентгеновского излучения.

Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли, – это калий-40, рубидий-87 и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало соответственно от урана-238 и тория-232 — долгоживущих изотопов, входивших в состав Земли с самого ее рождения. Значение радиоактивного изотопа калий-40 особенно велико для обитателей почвы — микрофлоры, корней растений, почвенной фауны. Соответственно заметно его участие во внутреннем облучении организма, его органов и тканей, поскольку калий является незаменимым элементом, участвующим в ряде метаболических процессов.

Уровни земной радиации неодинаковы, поскольку зависят от концентрации радиоактивных изотопов на конкретном участке земной коры. В среднем дозы от земной радиации составляют от 0,3 до 0,6 мЗв в год. Однако, на Земле имеются области, где уровень радиации в сотни раз превосходит средний (до 250 мЗв в год в некоторых районах Бразилии). Заметная часть эффективной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, формируется от радиоактивных веществ, проходящих через сложную систему биологических цепочек. Радионуклиды, образующиеся под действием космического излучения, составляют незначительную (20%) часть общего поступления. Большая часть поступления связана с радионуклидами ряда урана и тория, которые содержатся в почве.

Радон — инертный газ, попадающий в атмосферу из почв, скальных пород и строительных материалов. Средняя концентрация радона на уровне земли вне помещений составляет 8 Бк/м³. Содержание радона в помещениях в несколько раз выше, чем на открытой местности. Радон вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада ответственен за 75% годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, получаемой от земных источников радиации. Оценка полной среднегодовой эффективной дозы составляет 1,2 мЗв. Накопление радона, поступающего в помещения, зависит от скорости воздухообмена. Основным механизмом облучения — поступление с вдыхаемым воздухом внутри помещений. Из-за относительно низкого уровня воздухообмена внутри зданий концентрация радона там выше, чем на открытом воздухе. Терапевтический эффект лечения радоном на бальнеологических курортах доказан на обширном контингенте больных различного профиля.

С природной радиацией связано некоторые виды деятельности человека:

Использование ископаемых видов топлива. Уголь содержит незначительное количество природных радионуклидов, которые после его сжигания концентрируются в зольной пыли и поступают в окружающую среду с выбросами, несмотря на совершенствование систем очистки.

Использование фосфатов. Добыча фосфатов, которые используются главным образом для производства удобрений, ведется во многих местах. Большинство разрабатываемых в настоящее время месторождений содержит уран. В процессе добычи и переработки выделяется радон, да и сами удобрения содержат радионуклиды, проникающие в почву и далее в биологические цепочки.

Использование термальных водоемов. Некоторые страны эксплуатируют подземные ресурсы пара и горячей воды для производства электроэнергии и теплоснабжения. При этом происходит значительное поступление радона в окружающую среду. Вклад этого источника радиации может возрасти, поскольку энергетические ресурсы этого вида весьма велики.

Полная эффективная доза, обусловленная естественными источниками радиации составляет, в среднем по Земле, **около 2,4 мЗв в год.**

В дополнение к природным существуют искусственные источники радиации, связанные с возрастающим использованием ядерных технологии в медицине, промышленности, энергетике. Индивидуальные дозы, получаемые людьми от техногенных источников, различаются, хотя, в большинстве случаев, невелики. Основной вклад в дозу излучения от техногенных источников вносят медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением радиации.

3. ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источник ядерного излучения - радиоактивное вещество или устройство, в котором осуществляются радиоактивный распад или ядерные реакции.

Техногенные источники ионизирующего излучения - разнообразные технические устройства и комплексы различного назначения, в которых воплощаются современные достижения в развитии ядерных технологий.

Под радиоактивным источником подразумевают любое количество радиоактивного материала, которое предназначено для использования в качестве источника ионизирующего

излучения. Различают калибровочные, контрольные и промышленные источники ИИ. В данной лекции нас будут интересовать промышленные ИИИ.

Калибровочный ИИИ - источник ионизирующего излучения, используемый для калибровки измерительных приборов.

Контрольный ИИИ - источник ионизирующего излучения, используемый для проверки правильности работы измерительных приборов; помещённый на заданном расстоянии от детектора этот источник обеспечивает стабильное и повторяющееся показание прибора.

Промышленный ИИИ - Установка для облучения различных материалов ионизирующими излучениями с помощью источников с высокой радиоактивностью.

Источники ионизирующего излучения бывают внешними и внутренними. Внешний источник находится вне облучаемого объекта. К таким источникам относятся рентгеновские аппараты, препараты радиоактивных изотопов, ускорители, реакторы и др. К внутреннему источнику излучения относятся, например, радиоактивные вещества, попадающие внутрь организма и остающиеся в нём; используются для целей радиотерапии и диагностики.

Под герметичным ИИИ понимают радиоактивный источник излучений в герметичном контейнере или оболочке, которые должны быть достаточно прочными, чтобы исключить контакт персонала с радиоактивным материалом или его рассеивание в условиях эксплуатации или износа, на которые они рассчитаны.

Кроме того, различают открытый и закрытый источники ионизирующего излучения.

Закрытый ИИИ - радионуклидный источник излучения, в котором радиоактивный материал заключён в оболочку (ампулу или защитное покрытие), предотвращающую контакт персонала с радиоактивным материалом и его поступление в окружающую среду свыше допустимых уровней в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

Открытый ИИИ - радионуклидный источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нём радиоактивных веществ в окружающую среду.

Современные ядерно-технические установки обычно представляют собой сложные источники излучений. Например, источниками излучений действующего ядерного реактора, кроме активной зоны, являются система охлаждения, конструкционные материалы, оборудование и др. Поле излучения таких реальных сложных источников обычно представляется как суперпозиция полей излучения отдельных, более элементарных источников.

Любой источник излучения характеризуется:

1. Видом излучения – основное внимание уделяется наиболее часто встречающимся на практике источникам γ -излучения, нейтронов, β^- , β^{+-} , α -частиц.
2. Геометрией источника (формой и размерами) – геометрически источники могут быть точечными и протяженными. Протяженные источники представляют суперпозицию точечных источников и могут быть линейными, поверхностными или объемными с ограниченными, полубесконечными или бесконечными размерами.
3. Мощностью и ее распределением по источнику.
4. Энергетическим составом – энергетический спектр источников может быть моноэнергетическим (испускаются частицы одной фиксированной энергии), дискретным (испускаются моноэнергетические частицы нескольких энергий) или непрерывным (испускаются частицы разных энергий в пределах некоторого энергетического диапазона).
5. Угловым распределением излучения – среди многообразия угловых распределений излучений источников для решения большинства практических задач достаточно рассматривать следующие: изотропное, косинусоидальное, мононаправленное.

Загрязнение биосферы искусственными радионуклидами связано с эксплуатацией предприятий ядерного топливного цикла, с испытаниями ядерного оружия и других объектов, использующих источники ИИ. Ведущую роль играют объекты и предприятия ядерного топливного цикла, составляющие производственную основу ядерной энергетики.

ИИИ, вызванным к жизни деятельностью человека являются глобальные эффекты ядерных испытаний. Во второй половине 20-го века в атмосфере было проведено 543 испытания

ядерного оружия. В конце 20-го века событием, повлекшим за собой выпадением радиоактивных осадков, явилась авария на Чернобыльской атомной станции в 1986 году, хотя ее вклад в общую картину глобальных выпадений невелик.

Важными ИИИ являются ядерная энергетика и промышленность. Преимущества, представляемые ядерными технологиями, предопределили их широкое внедрение в медицину, а также в хозяйственную и техническую деятельность. Предприятия ядерной промышленности и энергетике размещены на территории многих стран и создают источник техногенного облучения. Радиоактивные выбросы атомных станций и предприятий ядерной промышленности регулируются жесткими нормативами, и поэтому практически не изменяют природный фон и содержание радионуклидов в окружающей среде. Это справедливо для нормально работающих ядерных установок. Конечно, радиационное воздействие значительно повышается в аварийных ситуациях. Аварии существенно различаются по объему радиоактивных выбросов, тяжести последствий их воздействия и размерам территорий, подвергшихся загрязнению.

3.1 Радионуклиды – источники ионизирующих излучений

Альфа-излучатели. Интенсивными источниками α -излучения являются некоторые радионуклиды с большим атомным весом (самарий-146, гадолиний-148, 150, полоний-210, радий-226, актиний-227, протактиний-231, нептуний-237), большинство изотопов тория (Th-228,-229,-230,-232), урана (U-232,-233,-234,-235,-236,-238), плутония (Pu-238,-239,-240,-241,-242), америция (Am-241,-243), кюрия (Cm-242,-243,-244,-245,-246), берклия (Bk-247) и калифорния (Cf-249,-250,-251,-252). При этом часть этих радионуклидов (самарий-146, гадолиний-148, 150, полоний-210, протактиний-231, плутоний-239,-240, нептуний-237) являются практически чистыми альфа-излучателями. Некоторые радионуклиды, кроме того, являются достаточно интенсивными источниками гамма-излучения сами или за счет дочерних нуклидов соответствующих рядов (радий-226, торий-232, уран-238). Большинство трансурановых радионуклидов являются к тому же и источниками нейтронов за счет спонтанного деления. Из-за очень малой проникающей способности альфа-излучение не представляет никакой опасности при внешнем облучении, т.к. не может проникнуть даже через поверхностный слой кожи. Но при попадании внутрь организма через органы дыхания или пищеварения оно может вызвать сильное повреждение живых клеток, т.к. в связи с высокой ионизирующей способностью при равной дозе облучения оказывает в 20 раз большее, чем гамма-излучение, вредное воздействие на живые клетки.

Бета-излучатели. Очень многие радионуклиды являются β -излучателями (тритий, бериллий-10, углерод-14, натрий-24, фосфор-32, сера-35, хлор-36, калий-40, кальций-45, железо-59, никель-63, медь-64, цинк-65, галлий-72, мышьяк-74,-76,-77, рутений-86, стронций-89,-90, иттрий-90,-91, цирконий-95, ниобий-95, молибден-99, технеций-99, рутений-103,-106, родий-106, палладий-109, серебро-110m,-111, кадмий-115,-115m, индий-114, сурьма-124,-125, йод-129,-131, цезий-134,-137, барий-140, лантан-140, церий-141,-144, празеодим-143, неодим-147, прометий-147, самарий-151, тербий-160, тантал-182, вольфрам-185, осмий-191, иридий-192, ртуть-203, таллий-204 и т.д.). Некоторые из них практически чистые β -излучатели (тритий, бериллий-10, углерод-14, фосфор-32, сера-35, хлор-36, кальций-45, никель-63, стронций-89,-90, иттрий-90, рутений-106, йод-129, прометий-147, самарий-151, тербий-160, тантал-182, вольфрам-185, осмий-191, ртуть-203, таллий-204 и др.). Остальные являются еще и γ -излучателями. Из-за слабой проникающей способности внешнее β -излучение может поражать только кожные покровы и глаза человека. Особую опасность представляют β -излучающие радионуклиды при попадании внутрь организма человека через органы дыхания и пищеварения. Поэтому при работе с ними следует использовать специальные защитные средства.

Гамма-излучатели. γ -излучение представляет собой жесткое электромагнитное излучение. Оно является сильно проникающим и представляет опасность как при внешнем, так и при внутреннем облучении. Гамма-излучающими является абсолютное большинство радионуклидов. Из наиболее

часто применяемых в промышленности следует отметить кобальт-60, церий-144, цезий-134,-137, иридий-192, селен-75, сурьму-124, европий-152,-154, тулий-170, радий-226. В приложении 4 приведены перечень наиболее часто перевозимых радионуклидов и характеристики испускаемого ими гамма-излучения.

Излучатели нейтронов. Нейтроны излучаются трансурановыми радионуклидами при спонтанном (самопроизвольном) делении. К наиболее интенсивным источникам нейтронов относятся: плутоний-238, -240, -242, -244, кюрий-242,-244,-246,-248, калифорний-250,-252,-254. Источником нейтронов является и отработавшее ядерное топливо, в котором накапливаются трансурановые элементы. Испускать нейтроны могут и радиоактивные материалы, содержащие в своем составе смесь интенсивных альфа-излучателей с легкими элементами, на которых может идти (α , n)-реакция, а также (γ , n)- реакция. Наибольшие сечения этой реакции имеют бериллий, дейтерий и бор. Нейтронное излучение может оказывать сильное воздействие на организм человека как из-за своей значительной проникающей способности, так и вследствие того, что при равной дозе облучения нейтроны оказывают в 6-10 раз большее биологическое воздействие на организм человека, чем γ -кванты.

Табл. 1 Характеристика радиоактивных, излучений радионуклидов

Радионуклид	Период полураспада	Энергия излучения, кэв			n/
			*		
Тритий	12,26 года	--	0,0057	--	--
Железо-55	2,74 года	--	--	x	--
Кобальт-57	270 сут	--	--	122,137	--
Кобальт-60	5,272 года	--	97	1173,1332	--
Селен-75	120,4 сут	--	--	66- 400	--
Криптон-85	10,73 года	--	251	514	--
Стронций-90	28,7 года	--	196	--	--
Иттрий-90	64,26 часа	--	928	511	--
Рутений-106	367 сут	--	10,4	--	--
Родий-106	29,9 с	--	1415	280 - 3036	--
Кадмий-109	459 сут	--	--	88	--
Олово-119м	290 сут	--	--	23; 65	--
Цезий-134	2,062 года	--	157	242 - 1365	--
Цезий-137	30,16 года	--	179	662	--
Церий-144	284,4 сут	--	78,1	40- 133	--
Празеодим-144	17,28 мин	--	1215	696 - 2185	--
Прометий-147	2,623 года	--	62	121,197	--
Европий-152	13,6 года	--	302	121 - 1528	--
Гадолиний-153	241 сут	--	--	97,4;103,2	--
Тулий-170	128,6 сут	--	315	78,6; 84,3	--
Иридий-192	74,08 сут	--	180	133 - 1060	--
Уран-233	$1,59 \times 10^{+5}$ лет	4800	--	29 - 320	$1,3 \times 10^{-12}$
Уран-234	$2,45 \times 10^{+5}$ лет	4750	--	53	$1,7 \times 10^{-11}$
Уран-235	$7,04 \times 10^{+8}$ лет	4400	--	143 - 204	$7,2 \times 10^{-11}$
Уран-238	$4,47 \times 10^{+9}$ лет	4180	--	--	$5,4 \times 10^{-7}$
Плутоний-236	2,85 года	5735	--	47 - 640	--
Плутоний-238	87,7 года	5486	--	43	$1,84 \times 10^{-9}$
Плутоний-239	24080 лет	5148	--	51,6	$4,4 \times 10^{-12}$

Плутоний-240	6540 лет	5156	--	45,2	$5,7 \times 10^{-8}$
Плутоний-241	14,6 года	4893	21	44 - 148	--
Плутоний-242	375000 лет	4890	--	45	$5,5 \times 10^{-6}$
Калифорний-252	2,64 года	6110	--	--	$3,1 \times 10^{-2}$
Америций-241	432,3 года	5480	--	26 - 721	--
Молибден-99	66 часов	--	380	140 - 961	--
Технеций-99m	6 часов	--	347	140 - 961	--
Углерод-14	5713 лет	--	49,44	--	--
Фосфор-32	14,3 сут	--	695	--	--
Фосфор-33	25,4 сут	--	77	--	--
Йод-125	60 сут	--	--	35,5	--
Йод-131	8 сут	--	181	361	--
Радий-226	1608 лет	4784	--	85,5; 186	--
Радон-222	3,8 сут	4987	--	510	--

* - средняя энергия бета-спектра; n/ - выход нейтронов на один –распад.

Как правило, делящиеся материалы выделяют в отдельный класс (особенно при соблюдении правил транспортировки). Приведём некоторые характеристики этих материалов.

Необлученное («свежее») ядерное топливо - слабо радиоактивное вещество, содержит оксиды урана (UO_2) в виде порошка, таблеток, брикетов, гранул темно-серого или черного цвета, не горючее. Токсичный химический продукт, опасен при попадании на кожные покровы и внутрь через органы дыхания. Топливо размещают в металлических изделиях (сборках) серебристо-белого цвета трубчатой конструкции шестигранного, круглого, треугольного и квадратного сечения, а также в виде небольших цилиндрических блоков. Неповрежденные сборки не представляют непосредственной опасности для человека.

Облученное ядерное топливо. Извлеченное из реактора отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) - отдельные тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) или сборки, содержат оксиды урана (UO_2 и др.), плутония (PuO_2 и др.) и другие трансураниевые нуклиды - продукты деления урана-235, образовавшиеся в результате облучения исходного топлива в реакторе. Оксиды - устойчивые соединения в виде таблеток темно-коричневого, черного цвета, нерастворимы в воде, температура плавления оксидов свыше $2000^\circ C$. ОЯТ имеет высокую альфа- и бета- активность, интенсивное проникающее нейтронное и гамма-излучение.

Гексафторид урана (UF_6) - кристаллическое, химически активное вещество бледно-желтого цвета, плотность 5 г/см^3 при $20^\circ C$, температура плавления $64^\circ C$ при давлении паров 0,1 МПа ($1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ атм.}$). При плавлении образуется прозрачная бесцветная жидкость плотностью $3,7 \text{ г/см}^3$. При температуре $0^\circ C$ практически не испаряется, при комнатной температуре давление пара составляет 1,4 кПа, при $95^\circ C$ - около 0,4 МПа. Пары ядовиты. На воздухе гексафторид урана гидролизует с образованием облака радиоактивных аэрозолей тяжелей воздуха, состоящих из частиц уранилфторида и фтористого водорода (не горючие), хорошо растворим в воде с образованием уранилфторида и плавиковой кислоты. Активно взаимодействует с маслами, спиртами, эфирами и другими органическими соединениями с образованием зеленой соли, тетрафторида урана белого цвета, уранилфторида и инертных фторуглеродов.

Оксиды урана - при обычных условиях устойчивые соединения, нерастворимы в воде. Плотность порошка - до $2,5 \text{ г/см}^3$, таблеток - до 11 г/см^3 , температура плавления - свыше $2000^\circ C$. Диоксид урана (UO_2) - порошок или таблетки черного или темно-коричневого цвета, закись-окись урана (U_3O_8) - порошок от темно-коричневого до черного цвета с содержанием урана до 84%, трехокись урана (UO_3) - желтый порошок.

Диоксид плутония (PuO_2) - мелкокристаллический порошок темного или темно-зеленого цвета. Температура плавления - $2240^\circ C$. Нерастворим в воде и минеральных кислотах. Диоксид

плутония - ядерноопасный делящийся материал. Минимальное значение критической массы для смеси диоксида плутония и воды - 500 г.

Плав уранилнитрата ($(\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$) - стекловидная масса яркого зеленовато-желтого цвета плотностью $2,8 \text{ г/см}^3$. Плав хорошо растворим в воде, нелетуч, на воздухе не окисляется. В нормальных условиях медленно разлагается с выделением воды и оксидов азота, что приводит к появлению неприятного запаха вследствие образования азотной кислоты. Оксиды азота - вредные химические вещества. Плав уранилнитрата при температуре около 60 Град С переходит в жидкое состояние. При воздействии огня и высокой температуры плав разлагается до оксидов урана с выделением оксидов азота и кислорода.

Плав уранилнитрата и продукты его разложения хорошо растворимы в органических соединениях, содержащих кислоту (спирты, кетоны, эфиры).

Тетрафторид урана (UF_4) - твердое кристаллическое вещество зеленого цвета плотностью до $2,5 \text{ г/см}^3$, температура плавления 960°C , гигроскопичен, слабо растворим в воде - до концентрации $0,1 \text{ г/л}$. В сухом воздухе устойчив при температуре до 200°C , при температуре выше 200°C разлагается с образованием закиси-окиси урана и летучего оксифторида. Пары воды взаимодействуют с тетрафторидом урана с образованием диоксида урана и газообразного фтористого водорода (ядовитое химическое вещество).

Уран металлический (U) - плотный (до $18,7 \text{ г/см}^3$) серебристый металл, после нескольких часов пребывания на воздухе покрывается цветами побежалости. Температура плавления - 1132°C . При механическом ударе искрит, пирофорный. На воздухе компактноуложенный металлический уран медленно окисляется до закиси-окиси, а при температуре $700...1000^\circ\text{C}$ достигает полного окисления в течение часа. Продукты окисления представляют собой мелкодисперсные порошки. Уран хорошо растворяется в соляной и азотной кислотах, реагирует с водой и водяным паром. Свойства сплавов урана близки к свойствам металлического урана.

Плутоний металлический (Pu) - серебристого цвета, на воздухе окраска переходит в цвета побежалости, при длительном нахождении на воздухе - в тускло черный, коричневый или зеленый цвет вследствие образования рыхлого оксидного покрытия. Плотность до $19,7 \text{ г/см}^3$, температура плавления - 670°C . Ядерноопасный делящийся материал. Продукты коррозии плутония - мелкодисперсные порошки, пирофорные, окисляются на воздухе, при 300°C могут самовоспламеняться. Плутоний металлический легко растворяется в кислотах, с щелочами не реагирует. Свойства сплавов плутония близки к свойствам металлического плутония.

Смеси диоксидов урана и плутония. Диоксиды урана (UO_2) и плутония (PuO_2) - таблетки (плотность до 11 г/см^3) черного или темно-коричневого цвета. При обычных условиях устойчивые соединения, твердые растворы смеси диоксидов растворяются в сильных кислотах, в воде нерастворимы. Температура плавления - свыше 2000°C . При хранении в плутонии накапливается америций-241, характеризуется высокой α -активностью и токсичностью.

Перечислим радионуклиды, используемые в различных устройствах в качестве ИИИ.

Радиационные приборы и устройства: цезий-137, кобальт-60, селен-75, иридий-192. Как правило, транспортируются без источника γ -излучения.

Генераторы радионуклидов для медицинской и другой техники: молибден-99 + технеций-99m, радий-226 + радон-222.

Радиоизотопные энергетические устройства: стронций-90, иттрий-90, плутоний-238.

Радиационные терапевтические аппараты: цезий-137, кобальт-60.

Радиационно-технологические установки с радионуклидными источниками гамма-излучения: цезий-137, кобальт-60.

Радиоизотопные приборы (релейные, толщиномеры, уровнемеры, плотномеры и др.): цезий-137, кобальт-60, криптон-85, стронций-90, иттрий-90

Упаковочные комплекты транспортные, содержащие в качестве защиты обеднённый уран: природный и обеднённый уран.

Закрытые радионуклидные источники ионизирующего излучения: кобальт-60, цезий-137, америций-241, иридий-192, стронций-90+иттрий-90 и др.

Радионуклидные источники тепла: стронций-90, плутоний-238.

Радионуклидные источники света: тритий, прометий-147, криптон-85.

Образцовые источники и другие изделия метрологического назначения: америций-241, кобальт-60, цезий-137, кадмий-109, европий-152 и др.

Соединения и изделия с радиоактивными нуклидами: йод-131, йод-125, технеций - 99m и др.

3.2 Источники α -частиц, протонов и атомов отдачи продуктов деления.

Обычно источником α - частиц является слой какого-либо нелетучего и долгоживущего α -излучающего элемента, отложенный на металлическую подложку (в нейтрализаторах статического электричества применяются эмалевые источники α -излучения). Промышленность выпускает источники альфа-излучения на основе таких радионуклидов, как америций-241, америций-243, кюрий-244, уран-234, плутоний-238, плутоний-239, Кюрий-244 и др.

Чистые альфа-излучатели (например, полоний-210) являются великолепными источниками энергии. Удельная мощность излучателя на базе ^{210}Po (период полураспада 138 дней) составляет более 1200 Ватт на кубический сантиметр. Полоний-210 послужил в качестве обогревателя советского «Лунохода-2», поддерживая температурные условия, необходимые для работы научной аппаратуры. В качестве источников энергии (а в паре с бериллием – и нейтронов), полоний-210 широко задействован в качестве источников питания удалённых маяков. Применяется он также для удаления статического электричества на текстильных фабриках, и ионизации воздуха для лучшего горения топлива в мартеновских печах, и даже для удаления пыли с фотоплёнок. Полоний-бериллиевые источники нейтронов применялись в первых атомных зарядах.

Для моделирования одновременного воздействия α -частиц и тяжелых заряженных частиц космического пространства на конструкционные материалы ракетных материалов и компоненты радиоэлектроники может использоваться изотопная установка α -частиц и осколков деления «Калифорний–252» на базе изотопа ^{252}Cf (период полураспада 2,2 года).

Табл.2 Параметры изотопной установки «Калифорний–252».

Изотоп излучателя	^{252}Cf
Активность	$4 \cdot 10^4$ Бк
Энергия осколков деления	спектр от 40 до 130 МэВ
Давление в рабочей камере	от 1 до 10^5 Па

На базе америция 241 (период полураспада 458 лет) выпускаются источники α -излучения АИА активностью $3 \cdot 10^4$ Бк

Выпускаются и низкоактивные источники, используемые в качестве эталонов альфа-излучения для калибровки радиометров и прочей дозиметрической или измерительной аппаратуры. Например, в России образцовые источники α -излучения изготавливаются на базе изотопов уран-234 и 238, плутоний-239.

Источником пучка ионов гелия, протонов или тяжелых ионов может быть ускоритель, например, циклотрон.

Циклотрон – ускоритель протонов (или ионов), в котором частота ускоряющего электрического поля и магнитное поле постоянны во времени. Частицы движутся в циклотроне по плоской развертывающейся спирали. Максимальная энергия ускоренных протонов 20 МэВ, в изохронном циклотроне до 1 ГэВ.

3.3 Источники электронов

3.3.1 Изотопные источники электронов

Источниками β -частиц являются соли β -излучающих радионуклидов. Источники бета-частиц выпускаются на базе таких изотопов, как тритий (^3H), Железо-55, никель-63, криптон-85,

стронций-90+ иттрий-90, Рутений-106+Родий-106, Церий-144+Празеодим-144, прометий-147 Таллий-204, Плутоний-238 и др.

Например, источник на базе ^{85}Kr (период полураспада: 10.73 года, энергия электронов: $E_{\beta}^{\text{max}}=687$ кэВ $E_{\beta}^{\text{CP}}=251$ кэВ (100%)) конструктивно представляет собой цилиндрическую капсулу из сплава титана или нержавеющей стали, имеющую выходное окно для β -излучения, выполненное из такого же материала (0.04 мм для сплавов титана и 0.025 мм для нержавеющей стали), заполненную газообразным радионуклидом Криптон-85. Источник герметизирован аргоно-дуговой или лазерной сваркой. Источники бывают дисковыми и точечными. Активность варьируется от 0,3 до 20 ГБк.

Примером изотопной установки электронного излучения, работающей на смеси изотопов ^{90}Sr - ^{90}Y является «СИРИУС-3200».

Табл.3 Параметры изотопной установки электронного излучения «СИРИУС-3200»

Изотоп излучателя	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$
Активность изотопа	3200 Ки
Энергии электронов	спектр 0...2 МэВ
Плотности потоков электронов	$(5 \cdot 10^6 \dots 6 \cdot 10^8)$ электр·см ⁻² ·с ⁻¹

3.3.2 Ускорители электронов

Более мощными источниками электронов являются ускорители. В отличие от изотопных источников бета-излучения, дающих непрерывный спектр электронов, ускорители дают пучок электронов строго фиксированной энергии, причём и поток и энергия электронов могут варьироваться в широких интервалах. В настоящее время в промышленности и технологических центрах всего мира используется 1100 ускорителей с энергией электронов (0.4-5) МэВ и мощностью (10-200 кВт). Более 70% всех ускорителей во всем мире применяются для радиационно-химических технологий,

используемых при производстве кабельной продукции с термостойкой изоляцией, полимерных труб горячего водоснабжения, термоусаживаемых труб, манжетов и пленок, хладостойких полимеров, полимерных рулонных композитных материалов.

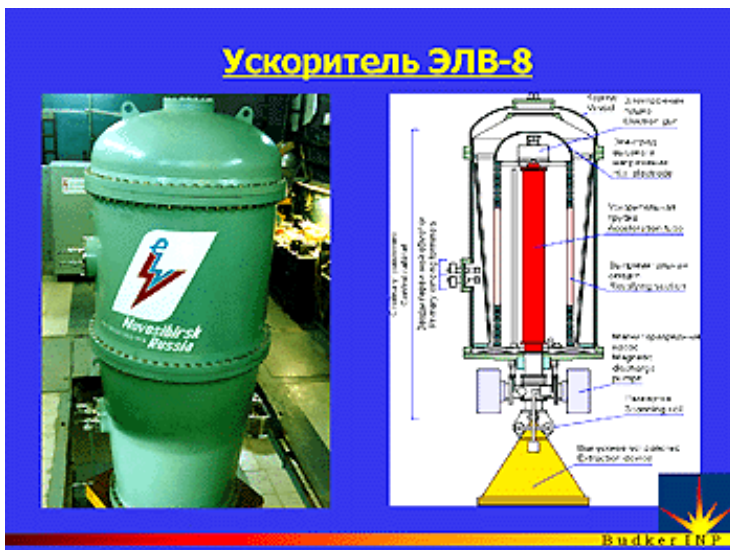


Рис.1. Ускоритель типа ЭЛВ-8 (Новосибирск)

(выпрямительного типа) с энергией (0.2-2.5) МэВ, мощностью от 20 до 400 кВт, имеющие

В России сейчас выпускаются промышленные ускорители прямого действия двух типов: - серии ЭЛВ

коэффициент полезного действия от розетки более 90% и серии ИЛУ (высокочастотного типа) с энергией (0.7-5) МэВ, мощностью от 10 до 50 кВт. Машины рассчитаны на непрерывную работу в промышленных условиях (до 7000 часов в году), снабжены разнообразными системами развертки пучка электронов для облучения различных продуктов.



Рис.2. Ускоритель электронов типа ЭЛВ-12

Построен также ускоритель электронов прямого действия с коммутатором на взрывае­мых проводниках УИН–10 и линейный резонансный ускоритель электронов «Электроника У–003».

Табл.4 Параметры импульсного ускорителя электронов УИН-10.

Энергия электронов	6...10 МэВ
Ток пучка	70...100 кА
"Длинный" импульс: длительность	400...3500 нс
доза за импульс	до 60 кР
"Короткий" импульс: длительность	75...100 нс
доза за импульс	до 100кР



Рис.3 Ускоритель электронов УИН–10

Табл.5 Параметры линейного резонансного ускорителя электронов «Электроника У–003».

Энергии электронов	4...8 МэВ
Средний ток пучка	до 700 мкА
Импульсы электронов	от 10 до 300 Гц и однократно
Площадь облучения	до 0,5*0,5 м ²

3.4 Источники рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение - невидимое электромагнитное излучение с длиной волны 0.06 - 20 ангстрем; образуется в результате торможения движущихся электронов в веществе, а так же при некоторых переходах электронов в облачках атомов.

Источниками **рентгеновского излучения** является рентгеновская трубка, некоторые радиоактивные изотопы, ускорители (бетатрон) и накопители электронов (синхротронное излучение), лазеры и др.

Бетатрон – циклический ускоритель электронов, в котором электроны ускоряются вихревым электрическим полем, порожденным переменным магнитным полем. Обычно энергия электронов в бетатроне не выше 50 МэВ.

3.4.1 Рентгеновская трубка

Рентгеновская трубка - электровакуумный прибор для получения рентгеновских лучей. Простейшая рентгеновская трубка состоит из стеклянного баллона с впаянными электродами - катодом и анодом (антикатодом). Электроны, испускаемые катодом, ускоряются сильным электрическим полем в пространстве между электродами и бомбардируют анод. При ударе электронов об анод их кинетическая энергия частично преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Важным компонентом рентгеновской трубки является **электронная пушка** (электронный прожектор), устройство для создания направленного потока электронов; применяется в телевизионных трубках, рентгеновской аппаратуре, электронных микроскопах.

Таким образом, чтобы получать рентгеновское излучение за счет взаимодействия электронов с веществом, нужно иметь источник электронов, средства их ускорения до больших скоростей и мишень, способную выдерживать электронную бомбардировку и давать рентгеновское излучение нужной интенсивности. Устройство, в котором все это есть, называется рентгеновской трубкой. В газоразрядных трубках содержится небольшое количество газа, и когда на электроды трубки подается большая разность потенциалов, атомы газа превращаются в положительные и отрицательные ионы. Положительные движутся к отрицательному электроду (катоде) и, падая на него, выбивают из него электроны, а они, в свою очередь, движутся к положительному электроду (аноду) и, бомбардируя его, создают поток рентгеновских фотонов.

В рентгеновской трубке (**Рис. 4**), источником электронов является вольфрамовый катод, нагреваемый до высокой температуры. Электроны ускоряются до больших скоростей высокой разностью потенциалов между анодом (или антикатодом) и катодом. Поскольку электроны

должны достичь анода без столкновений с атомами, необходим очень высокий вакуум, для чего нужно хорошо откачать трубку. Электроны фокусируются на аноде с помощью электрода особой формы, окружающего катод. Этот электрод называется фокусирующим и вместе с катодом образует «электронный прожектор» трубки. Подвергаемый электронной бомбардировке анод должен быть изготовлен из тугоплавкого материала, поскольку большая часть кинетической энергии бомбардирующих электронов превращается в тепло. Кроме того, желательно, чтобы анод был из материала с большим атомным номером, т.к. выход рентгеновского излучения растет с увеличением атомного номера. В качестве материала анода чаще всего выбирается вольфрам, атомный номер которого равен 74.

Конструкция рентгеновских трубок может быть разной в зависимости от условий применения и предъявляемых требований. Рентгеновские трубки различаются по типу конструкции, способу получения пучка электронов, его фокусировки, вакуумированию, охлаждению анода, размерам и форме фокуса (области излучения на поверхности анода) и др. Наиболее широко применяются отпаянные рентгеновские трубки с термоэмиссионным катодом, водяным охлаждением анода, электростатической фокусировкой электронов. Термоэмиссионный катод рентгеновской трубки обычно представляет собой спираль или прямую вольфрамовую нить, накаливаемую электрическим током. Рабочий участок анода – металлическая зеркальная поверхность – расположен перпендикулярно или под некоторым углом к электронному пучку. Для получения сплошного тормозного спектра рентгеновского излучения высоких энергий и интенсивностей служат аноды из Au, W; в структурном анализе используются рентгеновские трубки из Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, Ag. Наиболее распространены рентгеновские трубки с неподвижным либо вращающимся водоохлаждаемым анодом мощностью в несколько кВт. Материалы анодов (и их длина волны, λ) – Cu (1,33 нм), Al(0,834 нм), Mo(0,54 нм), Pd (0,434 нм).

Основные характеристики рентгеновской трубки: предельно допустимое ускоряющее напряжение (1-500 кВ), электронный ток (0,01 мА – 1 А), удельная мощность, рассеиваемая анодом (10 -104 Вт/мм²), общая потребляемая мощность (0,002 Вт – 60 кВт). Кпд рентгеновской трубки составляет 0,1 – 3%.

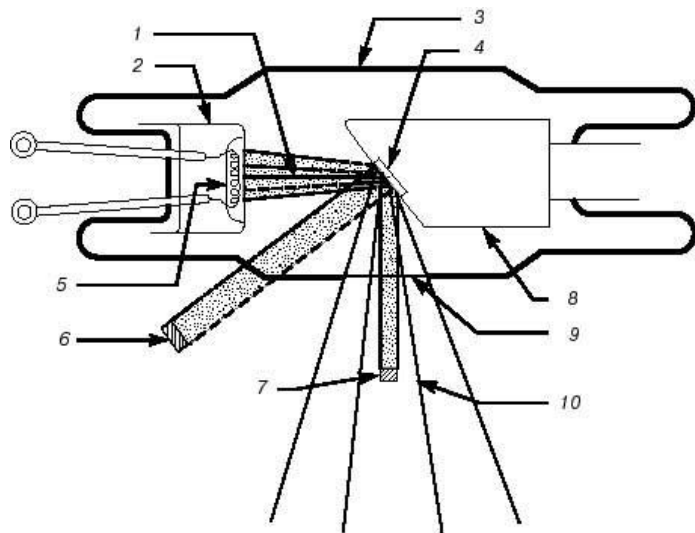
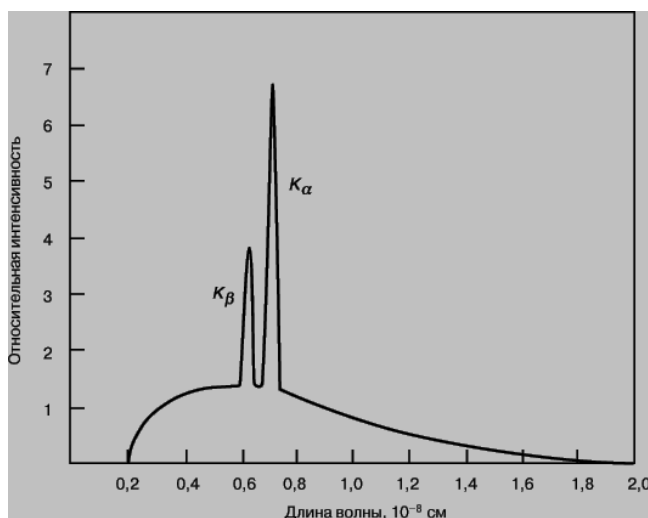


Рис.4 Рентгеновская трубка Кулиджа. При бомбардировке электронами вольфрамовой антикатод испускает характеристическое рентгеновское излучение. Поперечное сечение рентгеновского пучка меньше реально облучаемой площади. 1 – электронный пучок; 2 – катод с фокусирующим электродом; 3 – стеклянная оболочка (трубка); 4 – вольфрамовая мишень (антикатод); 5 – нить накала катода; 6 – реально облучаемая площадь; 7 – эффективное фокальное пятно; 8 – медный анод; 9 – окно; 10 – рассеянное рентгеновское излучение

Рентгеновское излучение возникает при взаимодействии электронов, движущихся с большими скоростями, с веществом. Когда электроны соударяются с атомами какого-либо вещества, они быстро теряют свою кинетическую энергию. При этом большая ее часть переходит в тепло, а небольшая доля, обычно менее 1%, преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Эта энергия высвобождается в форме квантов – частиц, называемых фотонами, которые обладают энергией, но масса покоя которых равна нулю. Рентгеновские фотоны различаются своей энергией, обратно пропорциональной их длине волны. При обычном способе получения рентгеновского излучения получают широкий диапазон длин волн, который называют рентгеновским спектром. В спектре присутствуют ярко

выраженные компоненты, как это показано на **Рис. 4**. Широкий «континуум» называют непрерывным спектром или белым излучением. Налагающиеся на него острые пики называются характеристическими рентгеновскими линиями испускания. Хотя весь спектр есть результат столкновений электронов с веществом, механизмы возникновения его широкой части и линий разные. Вещество состоит из большого числа атомов, каждый из которых имеет ядро, окруженное электронными оболочками, причем каждый электрон в оболочке атома данного элемента занимает некоторый дискретный уровень энергии.

Обычно эти оболочки, или энергетические уровни, обозначают символами K , L , M и т.д., начиная от ближайшей к ядру оболочки. Когда налетающий электрон, обладающий достаточно большой энергией, соударяется с одним из связанных с атомом электронов, он выбивает этот электрон с его оболочки. Обычный рентгеновский спектр состоит из непрерывного спектра (континуума) и характеристических линий (острые пики). Линии $K\alpha$ и $K\beta$ возникают вследствие



взаимодействий ускоренных электронов с электронами внутренней K -оболочки. Опустевшее место занимает другой электрон с оболочки, которой соответствует большая энергия. Этот последний отдает избыток энергии, испуская рентгеновский фотон.

Рис.5 Типичный спектр излучения, испускаемого рентгеновской трубкой.

Поскольку электроны оболочек имеют дискретные значения энергии, возникающие рентгеновские фотоны тоже обладают дискретным спектром. Этому соответствуют острые пики для определенных длин волн, конкретные значения которых зависят от элемента-мишени. Характеристические линии образуют K -, L - и M -серии, в зависимости от того, с какой оболочки (K , L или M) был удален электрон. Соотношение между длиной волны рентгеновского излучения и атомным номером называется

законом Мозли (**Рис. 3**).

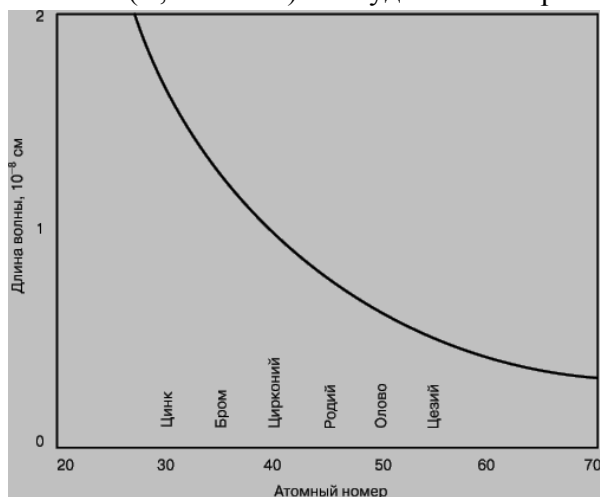


Рис.6. Зависимость длины волны рентгеновского излучения от заряда ядра элемента мишени

Длина волны характеристического рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами, зависит от атомного номера элемента. Кривая соответствует закону Мозли: чем больше атомный номер элемента, тем меньше длина волны характеристической линии.

Если электрон наталкивается на относительно тяжелое ядро, то он тормозится, а его кинетическая энергия выделяется в виде рентгеновского фотона примерно той же энергии. Если же он пролетит мимо ядра, то потеряет лишь часть своей энергии, а остальную будет передавать попадающимся на его пути другим атомам. Каждый акт потери энергии ведет к излучению фотона с какой-то энергией. Возникает непрерывный рентгеновский спектр, верхняя граница которого соответствует энергии самого быстрого электрона. Таков механизм образования непрерывного спектра, а максимальная энергия (или минимальная длина волны), фиксирующая

границу непрерывного спектра, пропорциональна ускоряющему напряжению, которым определяется скорость налетающих электронов. Спектральные линии характеризуют материал бомбардируемой мишени, а непрерывный спектр определяется энергией электронного пучка и практически не зависит от материала мишени.

Характеристическое рентгеновское излучение поликристаллического анода рентгеновской трубки распространяется в пространстве изотропно, тогда как распространение тормозного рентгеновского излучения анизотропно. При малых напряжениях на рентгеновской трубке (до 20 – 30 кВ) тормозное рентгеновское излучение имеет максимальную интенсивность в направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению движения электронов, возбуждающих рентгеновское излучение. При очень высоких напряжениях на рентгеновской трубке (более нескольких сотен тысяч кВ) почти все излучение распространяется в направлении движения пучка электронов и выходит наружу через пластинку анода.

Рентгеновское излучение можно получать не только электронной бомбардировкой, но и облучением мишени рентгеновским же излучением от другого источника. В этом случае, однако, большая часть энергии падающего пучка переходит в характеристический рентгеновский спектр и очень малая ее доля приходится на непрерывный. Очевидно, что пучок падающего рентгеновского излучения должен содержать фотоны, энергия которых достаточна для возбуждения характеристических линий бомбардируемого элемента. Высокий процент энергии, приходящейся на характеристический спектр, делает такой способ возбуждения рентгеновского излучения удобным для научных исследований.

Недостаток рентгеновских трубок – низкая производительность, обусловленная малым коэффициентом преобразования энергии электронного пучка в мягкое рентгеновское излучение (10^{-5}). Более производительными являются установки, в которых точечными источниками излучения являются плазма, возбуждаемая лазерным излучением, или сильноточный разряд в газе.

3.4.2 Лазер.

Наивысшей импульсной яркостью по сравнению с другими источниками излучения являются рентгеновские лазеры.

*Рентгеновский лазер – источник когерентного электромагнитного излучения рентгеновского диапазона. Иногда используется термин **лазер**.*

Длина волны испускаемого излучения зависит от материала лазера (например, 206A(Se), 182A(C), 81A(F), 46A(Al)). Длительность импульса генерации рентгеновского лазера составляет 0,1-10 нс и определяется временем жизни плазменного образования. Величина коэффициента усиления за один проход лежит в пределах 3 – 16, т.е. максимальное усиление относительно уровня спонтанного излучения составляет 10^7 . Максимальная энергия, полученная в импульсе, 10 мДж, угловая расходимость пучка 10 мрад. Сравнение параметров импульса лазера накачки и импульса рентгеновского излучения показывает, что коэффициент преобразования по энергии составляет лишь 10^{-5} . Однако этого достаточно для проведения ряда физических и биологических экспериментов.

Активная среда рентгеновского лазера – высокоионизированная плазма с электронной температурой от нескольких сотен эВ до нескольких кэВ, создаваемая при облучении мишени (например, тонкой фольги из селена и иттрия) мощными лазерами видимого и ИК-диапазона. Плазменное образование имеет длину в несколько сантиметров (0,5 – 5 см) и поперечный размер 0,01-0,1 см. плазма создается фокусировкой излучения 2-й гармоники неодимового лазера, либо излучения CO₂-лазера, имеющих энергию излучения 1 кДж и длительность импульса генерации 0,1 – 10 нс.

3.4.3 Ускорители

Источником рентгеновского излучения могут являться ускорители частиц. Если мишень бомбардировать протонами, ионами гелия или более тяжелыми ионами с энергией в несколько

МэВ на нуклон, то мишень будет испускать рентгеновское излучение линейчатого спектра с очень слабым непрерывным излучением (контрастность характеристических линий такого рентгеновского излучения очень высокая). Для ускорения ионов используют электростатические генераторы или циклотроны. Тормозное излучение рентгеновского диапазона часто получают с помощью ускорителей электронов (см. ниже).

Источниками мощного рентгеновского излучения являются накопительные кольца **синхротрона** на энергию 0,6 – 1 ГэВ с расположенными на них литографическими станциями (свыше 10 на каждом накопительном кольце). Такие источники создают высокую интенсивность и хорошую коллимацию рентгеновского излучения. Излучение рентгеновского диапазона, присутствующее в синхротронном излучении выделяют монохроматором и используют для различных целей. Оно на несколько порядков превосходит по интенсивности излучение рентгеновской трубки. Рентгеновская составляющая синхротронного излучения поляризована и распространяется только в плоскости кольца синхротрона. Вертикальная расходимость этого излучения очень мала.

***Синхротрон** - ускоритель электронов с орбитой постоянного радиуса, растущим во времени магнитным полем, определяющим этот радиус, и постоянной частотой ускоряющего электрического поля. В синхротроне достигнуты энергии 20 ГэВ.*

***Синхротронное излучение** – излучение электромагнитных волн заряженными частицами, движущимися с релятивистскими скоростями в магнитном поле, искривляющем их траектории. Впервые наблюдалось в синхротроне (отсюда название).*

Уникальные свойства синхротронного излучения (широкий спектральный диапазон, большая мощность, высокая яркость источников, естественная поляризация излучения) объясняют большой интерес к его использованию для решения фундаментальных и прикладных задач. Центры синхротронного излучения, число которых сейчас во всем мире более 60, являются в последние годы одним из основных поставщиков новой научной информации в биологии, физике поверхности, физике твердого тела, материаловедении.

Еще более интенсивную рентгеновскую составляющую содержит *ондуляторное* излучение, которое на несколько порядков превосходит по интенсивности рентгеновскую составляющую синхротронного излучения; в этих случаях энергия рентгеновского излучения столь велика, что кристалл-анализатор, используемый в рентгеновской спектральной аппаратуре, нагревается до нескольких сотен градусов Цельсия и разрушается, если не приняты специальные меры защиты. Очень высокой интенсивностью обладает также рентгеновская составляющая *переходного излучения*.

***Ондулятор** – прибор, в котором создаются периодическое электрическое, магнитное или электромагнитное поля; проходя через ондулятор, заряженные частицы испускают ондуляторное излучение.*

***Ондуляторное излучение** – излучение, испускаемое заряженными частицами (например, электронами) при движении их по периодически искривленной электрическим или магнитным полем траектории (синусоиде, спирали).*

3.4.4 Радионуклидные источники рентгеновского излучения

В качестве источников радиоактивного излучения можно использовать такие радионуклиды, как железо-55, криптон-85, стронций-90+иттрий-90, кадмий-109, прометий-147, таллий-204, плутоний-238. Некоторые из этих изотопов непосредственно испускают радиоактивное излучение. Например, атом ^{55}Fe в результате К-захвата превращается в ^{55}Mn и испускает К-спектр Mn, один из радиоактивных изотопов тулия, ^{170}Tm , - источник мягкого рентгеновского излучения. Ядра других радиоактивных элементов испускают электроны (например, ^{90}Sr) или α -частицы (например, ^{210}Po), бомбардирующие мишень, которая испускает рентгеновское излучение. Интенсивность излучения изотопных источников на несколько порядков ниже интенсивности излучения рентгеновской трубки, но их габариты, вес и стоимость значительно меньше, чем у установки с рентгеновской трубкой. Кроме того, изотопные источники рентгеновского излучения используются в полевых условиях, поскольку не требуют источников

питания. Примером может служить созданный в КБ-11 (Арзамас-16) под руководством В.А.Цукермана источник мягкого рентгеновского излучения на основе изотопа «железо-55». Преимущества - очевидны: полная автономность, надёжность, малые размеры и вес. Эти источники применялись для рентгенофлюоресцентного анализа пород планеты Венера автоматическими межпланетными станциями «Венера-13», «Венера-14», «Вега-1» и «Вега-2».

3.5 Источники γ -излучения

3.5.1 Изотопные гамма-установки

Источники гамма-излучения изготавливаются на основе таких радионуклидов, как кобальт-57, кобальт-60, цинк-65, селен-75, серебро-110м, сурьма-124, барий-133, цезий-134, цезий-137, церий-144+празеодим-144, европий-152+европий-154, тулий-170, иридий-192, америций-241, плутоний-238, плутоний-239.

В настоящее время мощные источники γ -излучения нашли применение в медицине (радиотерапия, стерилизация медицинских инструментов и материалов), сельском хозяйств (стимуляция роста и урожайности зерновых и овощных культур, борьба с вредителями), радиационной физике (материаловедение), для обеззараживания и очистки промышленных стоков, твердых и жидких отходов производств, в радиационной химии (радиационно-химическая модификация материалов, синтез полимеров), для испытания изделий в поле интенсивного гамма-излучения, для стерилизации и дезинфекции пищевых продуктов и др.

Примерами мощных источников γ -излучения являются ^{60}Co изотопные установки ГУ-200, ГАММАРИД, ИССЛЕДОВАТЕЛЬ, РХМ-гамма-20, Агат-С.



Рис.7. Внешний вид установки РХМ-гамма 20

Табл.6 Параметры установки ГУ-200 (источник – ^{60}Co).

Максимальная активность источника	200 кГ–экв. Ра
Источник излучения	^{60}Co
Экспозиционная мощность дозы	от 3 до $1,5 \cdot 10^3$ Р/с
Объем облучательной камеры	$4 \cdot 4 \cdot 4 \text{ м}^3$

Мощные (до 50 – 60 Ки) гамма-источники на основе радионуклидов европия дают возможность создания установок для дезинфекции сточных вод. При этом утилизируются облученные органы регулирования ядерных реакторов.

В России выпускаются различные модификации медицинских γ -терапевтических аппаратов типа "АГАТ-С"; "Рокус-АМ"; "АГАТ-ВУ" с на основе кобальта-60, с активностью от $1,9 \cdot 10^{14}$ Бк до $5,1 \cdot 10^{14}$ Бк.

Табл.7. АГАТ-С (изотопного источника непрерывного гамма-излучения)

Изотоп излучателя	^{60}Co
Средняя энергия гамма-квантов	1,25 МэВ
Зона облучения	$20 \cdot 20 \text{ мм}^2$
Мощность дозы гамма-излучения	
на расстоянии 0,5 м	$3,4 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$
на расстоянии 6 м	$0,04 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$

В радиологических отделениях онкологических диспансеров эксплуатируются закрытые радионуклидные источники с суммарной активностью до $5,1 \cdot 10^{14}$ Бк. Переносные гамма-дефектоскопы типа "Гаммарид" и "Стапель-5М" на основе иридия-192 имеют источники с активностью от 85 до 120 Бк.

Источник γ -излучения ^{75}Se обеспечивает томографическую картину распределения поглотителей и источников гамма-излучения в неоднородной матрице. Такие источники используются в составе транспортабельного томографического гамма-сканера, который применяет автоматизированную гамма- томографию для определения функции трёхмерного распределения радионуклидов в изучаемом пространстве.

3.5.2 Ускорители – источники тормозного излучения

Помимо радионуклидов источниками тормозного гамма-излучения могут быть ускорители электронов (линейные ускорители, циклотроны и т.п.). Для получения тормозного излучения высокой энергии, пучок электронов направляют на мишень, изготовленную из тугоплавкого материала. Испытания влияния на материалы и конструкции мощных импульсов гамма-излучения проводятся в поле тормозного гамма-излучения, создаваемом импульсными ускорителями электронов ЛИУ–10, ЛИУ–15, УИН–10, РИУС–5.

Табл.8 Параметры импульсного ускорителя электронов РИУС-5.

Токи электронов в импульсе	до 100 кА
Энергия электронов в импульсе	до 14 МэВ
Средние энергии гамма-квантов	2 МэВ
Мощности дозы тормозного гамма-излучения	до 10^{13} Р/с
Длительности импульсов	от 20 нс до 2 мкс.

3.6 Портативные источники нейтронов

В качестве портативных источников нейтронов (используемых, например для обнаружения взрывчатки и наркотиков, используются либо изотопные источники (например, Cf-252), излучающие нейтроны со средней энергией 2.5 МэВ, либо генераторы нейтронов со средней энергией 14 МэВ (d-t реакция) и 2.5 МэВ (d-d реакция).

Различают источники тепловых (энергия в районе 0,01 эВ), быстрых (энергия до 8 МэВ) и сверхбыстрых (энергия свыше 20 МэВ) нейтронов.

Источник нейтронов - устройство или материал, испускающий или способный испускать нейтроны.

Источник нейтронов может быть постоянным, импульсным, стабильным или нестабильным.

Импульсный источник нейтронов - источник, испускающий нейтроны в течение одного или многих интервалов времени, каждый из которых меньше времени наблюдения.

Источник нейтронов непрерывного действия - источник, непрерывно испускающий нейтроны в течение времени наблюдения.

Стабильный источник нейтронов - источник, из которого в единицу времени вылетают нейтроны, число которых остаётся постоянным в требуемых пределах в течение заданного времени наблюдения.

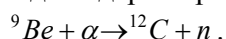
Нестабильный источник нейтронов - источник нейтронов, из которого в единицу времени вылетают нейтроны, число которых не сохраняется постоянным в требуемых пределах в течение времени наблюдения.

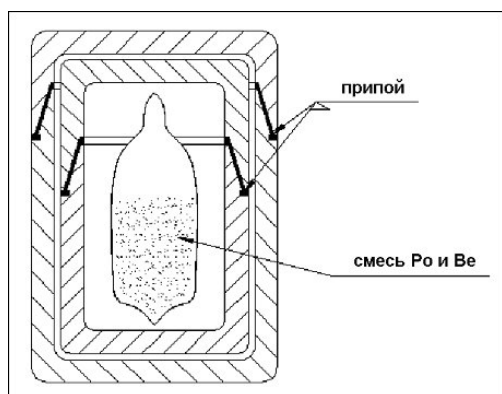
Эталонный источник тепловых нейтронов содержит графитовый замедлитель, обеспечивающий строго определенную и постоянную плотность нейтронного потока в определённых точках и может быть использован в качестве эталонной.

3.6.1 Радионуклидные нейтронные источники

Изотопные источники - устройства, в которых идут ядерные реакции с образованием нейтронов. При этом излучение, испускаемое радионуклидом (например, α -частицы) вступает в ядерную реакцию со специально подобранным веществом (например, бериллием), в результате которой образуются нейтроны. Источники нейтронного излучения могут быть изготовлены на основе радионуклидов Америций-241, Плутоний-238, Плутоний-239, Кюрий-248, Калифорний-252.

В лабораторном источнике в запаянной ампуле находится смесь α -активного нуклида с бериллием. При этом в источнике происходит ядерная реакция:





Наиболее известными ампульными источниками являются радиево-бериллиевый и полониево-бериллиевый.

Рис.8 Нейтронные источники, выпускаемые в 1961-1970 годах

Полониево-бериллиевый источник нейтронов представляет собой механическую смесь полония и бериллия. Нейтроны испускаются ядрами бериллия под воздействием альфа-частиц, образующихся при распаде полония. Полоний-210 - практически чистый альфа-

излучатель с энергией 5,305 МэВ и периодом полураспада 138,4 суток. Распад полония сопровождается гамма-излучением слабой интенсивности. Основной недостаток - небольшой срок службы, определяемый периодом полураспада полония, однако, этот недостаток можно рассматривать как преимущество. В связи с относительно небольшим периодом полураспада при использовании полония-210 в изделиях практически не возникает проблемы долговременного хранения радиоактивных отходов. Так, источник на основе полония-210 с тепловой мощностью 10 Вт через 12 лет будет иметь активность $\leq 0,1$ микро Ки, что по санитарным правилам РФ уже не превышает уровень радиоактивности источников, для работы с которыми требуется разрешение Государственного санитарного надзора. При разбавлении этой активности в 10 кг инертного вещества полученный материал уже не является радиоактивными отходами. В СССР полоний-бериллиевые нейтронные источники в массовом количестве применяли для нейтронного каротажа нефтяных и газовых скважин при геологоразведке, а также для исследовательских и опытно-конструкторских работ и для запуска ядерных реакторов.

Другой тип радионуклидного источника нейтронов строится на калифорний-бериллиевой смеси. Калифорний-252 имеет период полураспада 2,6 года. При этом самопроизвольно делится 3 % всех атомов и при каждом делении выделяется четыре нейтрона. Вот именно такая нейтронная эмиссия и делает ^{252}Cf интересным, ибо 1 г в секунду выделяет $2,4 \cdot 10^{12}$ нейтронов. Это соответствует нейтронному потоку среднего ядерного реактора! Если бы такое нейтронное излучение захотели получить классическим путем из радиево-бериллиевого источника, то для этого потребовалось бы 200 кг радия. Столь огромного запаса радия не существует на Земле. Даже такое невидимое глазом количество, как 1 мкг ^{252}Cf , дает более 2 миллионов нейтронов в секунду. Поэтому ^{252}Cf в последнее время используют в медицине в качестве точечного источника нейтронов с большой плотностью потока для локальной обработки злокачественных опухолей.

Изотопный источник ^{252}Cf обладает следующими преимуществами: постоянство величины потока (не требуется мониторинг); длительный ресурс (более трех лет); сравнительно низкая стоимость (примерно 3000 долларов США) и "точечность" источника (его габариты малы по сравнению с геометрией облучения и измерения). Среди недостатков ^{252}Cf ограничения по порогу реакции взаимодействия и по измерительным возможностям; радиационная опасность в эксплуатации (постоянно действующий излучатель) и необходимость мер радиационной защиты при хранении. Кроме того, ^{252}Cf принадлежит к ядерным материалам, которые являются федеральной собственностью, стратегически значимы в проблеме ядерного нераспространения и, следовательно, требуют особых мер государственного учета, контроля и физической защиты.

Во многих случаях калифорний может теперь заменить атомный реактор, например для таких специальных аналитических исследований, как нейтронная радиография или активационный анализ. С помощью нейтронной радиографии просвечиваются детали самолетов, части реакторов, изделия самого различного профиля. Повреждения, которые обычно невозможно обнаружить, теперь легко находят. Для этой цели в СССР и США разработана

транспортабельная нейтронная камера с ^{252}Cf в качестве источника излучения. Она позволяет вести работу вне зависимости от стационарного атомного реактора. В борьбе с преступностью в США такая нейтронная камера показала свой превосходный "нюх". Таблетки ЛСД и марихуана, спрятанные в патронных гильзах, были сразу обнаружены. С помощью рентгеновских лучей контрабандные наркотики найти не удавалось.

В настоящее время нейтронные источники всё шире применяются для решения проблемы противодействия незаконному обороту взрывчатых, химических, биологических и других опасных веществ, как составляющая часть борьбы с терроризмом и преступностью,

3.6.2 Генераторы нейтронов.

Генераторы нейтронов обычно выдают нейтроны со средней энергией 14 МэВ (по d-t реакции) и 2.5 МэВ (по d-d реакции). Преимущества *портативных* нейтронных генераторов (НГ) с «отпаянной» нейтронной трубкой таковы: они практически не обладают радиационной опасностью в выключенном состоянии при хранении, если не принимать во внимание некоторую наведенную активность конструктивных материалов генератора; наличие регулируемого режима излучения нейтронов позволяет производить регистрацию полезных эффектов в интервалах между импульсами нейтронов, что улучшает фоновые условия при измерениях. К недостаткам НГ относятся высокая стоимость; ограниченный ресурс работы (до 300 часов); большие габариты по сравнению с источником из ^{252}Cf (находящимся в рабочем состоянии, т.е. без защитного контейнера) и большая масса (от 5 кг и выше); значительное энергопотребление (от 200 Вт и выше); ограниченное время непрерывной работы (требуется периодическое отключение для охлаждения мишени); нестабильность выхода нейтронов от импульса к импульсу (до 50 %) и невозможность рассматривать нейтронный генератор как точечный источник в задачах обнаружения взрывчатого вещества.

Более мощными источниками нейтронов являются ядерные реакторы, плазменные установки для термоядерного синтеза и ускорители. Мощный экологически безопасный источник нейтронов, рентгеновского излучения, ионных и электронных пучков, строится на базе, основанной на плазменном фокусе с высокой частотой повторения (примером может служить установка ПФ-3, смонтированная в Курчатовском институте). Ещё более мощные источники нейтронов (порядка 2 МВт/м²) высоких энергий (14 МэВ) строятся на принципе газодинамической ловушки.

4. УСКОРИТЕЛИ

Источниками практически всех видов ионизирующих излучений являются ускорители элементарных частиц и ионов.

Создание первых ускорителей Дж.Кокрофтом и Э.Уолтоном, Р.Ван-де-Графом, Э.Лоуренсом в 1931-32 открыло новую эру в ядерной физике. Экспериментаторы получили в свое распоряжение удобные инструменты, на которых можно было получать пучки ускоренных заряженных частиц с энергией от нескольких десятков кэВ до десятков МэВ. Современные ускорители позволяют ускорять частицы до энергии нескольких ТэВ.

Ускорители заряженных частиц – установки для получения заряженных частиц (электронов, протонов, атомных ядер, ионов) больших энергий с помощью электрического поля. Частицы движутся в вакуумной камере; управление их движением (формой траектории) производится магнитным полем. По характеру траекторий частиц различают циклические и линейные ускорители, а по характеру ускоряющего электрического поля - резонансные и нерезонансные ускорители. К циклическим относятся ускорители электронов: бетатрон, микротрон, синхротрон и ускорители тяжелых частиц (протонов и др.): циклотрон, фазотрон и протонный синхротрон. Все циклические ускорители, за исключением бетатрона, - резонансные. Линейные высоковольтные ускорители дают интенсивные пучки частиц с энергией до 30 МэВ. Самую высокую энергию электронов дают линейные резонансные ускорители (20 ГэВ), протонов – протонный синхротрон (500 ГэВ). Помимо первичных пучков ускоренных заряженных частиц,

ускорители являются источником пучков вторичных частиц (мезонов, нейтронов, фотонов и т.д.), получаемых при взаимодействии первичных частиц с веществом.

Возникновение ускорителей инициировалось в первую очередь интересом превращения одних химических элементов в другие. Действительно, для превращения одних атомов в другие необходимо разогнать субатомные частицы (протоны или электроны) и бомбардировать ими атомные ядра. Впервые такие превращения удалось совершить в 1919 г., используя α -частицы, испускаемые радиоактивными элементами. Однако скорость таких частиц была недостаточной, поэтому пришлось разработать специальные установки, которые бы разгоняли большее количество частиц до большей скорости. Такие установки получили название *линейных ускорителей*.

В ускорителях увеличение энергии заряженных частиц происходит под действием электрического поля, направленного вдоль импульса частицы. В ускорителях прямого действия (**линейный ускоритель** Ван-де-Графа на базе электростатического генератора) заряженная частица, имеющая заряд Ze , ускоряется в постоянном электромагнитном поле, приобретая кинетическую энергию T соответствующую высокому напряжению V создаваемому источником.

$$T = ZeV.$$

В таких ускорителях частицы могут приобретать энергию до ~ 10 МэВ. Их существенным преимуществом является непрерывность, высокая интенсивность и высокая стабильность по энергии ускоренного пучка ($\sim 0.01\%$).

Ток пучка на ускорителях Ван-де-Граафа может достигать нескольких миллиампер.

***Линейный ускоритель** – ускоритель заряженных частиц, в котором траектории частиц близки к прямым линиям. Максимальная энергия электронов, достигаемая на линейном ускорителе, 20 ГэВ, протонов до 800 МэВ.*

***Электростатический генератор** – устройство, в котором напряжение создается при помощи механического переноса электрических зарядов механическим транспортером. Генератор с гибким транспортером из диэлектрической ленты называется генератором Ван де Граафа. Наибольшее напряжение электростатического генератора 30 МВ.*

В 1930 г. американский физик Эрнест О. Лоуренс создал новый тип ускорителя. В этом ускорителе протоны двигались в постоянном магнитном поле по разворачивающейся спирали, а частота ускоряющего электрического напряжения совпадала с частотой обращения частицы в ускорителе. Свой ускоритель Лоуренс назвал **циклотроном** от греческого “киклос” (*kyklos*) — круг, кольцо, цикл и “-трон” — суффикса отличающего субатомные частицы (электрон, нейтрон и т. д.). Первая установка Лоуренса имела диаметр всего 10 см и была собрана из стекла и сургуча. Вскоре совместно с М. С. Ливингстоном Лоуренс построил металлическую модель таких же размеров, и она могла ускорять ионы водорода (протоны). Затем под руководством Лоуренса был построен ускоритель диаметром 28 см, который Лоуренс описал в 1932 г. Этот год и считают годом рождения циклотрона.

В циклотроне частицы ускоряются переменным электромагнитным полем постоянной частоты. Частицы ускоряются от нулевых энергий до максимальных, двигаясь по раскручивающейся спирали увеличивающегося радиуса R , в постоянном магнитном поле B .

$$R = cp/300ZB.$$

где cp - импульс частицы, умноженный на скорость света, измеряется в МэВ, B - индукция магнитного поля, измеряется в Теслах, R - измеряется в метрах. Обычно циклотроны используются для ускорения протонов и ионов. Предельная энергия для протонов в циклотронах составляет ~ 20 МэВ при поле $B \sim 2$ Тесла и частоте ускоряющего поля 30 МГц.

Циклотрон Лоуренса не был еще совершенным прибором. Он имел такие недостатки, как спиральная траектория и нарушение синхронности [от греч. «син» (*syn*) — вместе и «хронос» (*chronos*) — время] между пролетом электронов и переменным электрическим ускоряющим полем. Спираль не могла раскручиваться до бесконечности, ее ограничивали размеры циклотрона. А выпадение из синхронизма получалось из-за того, что разгоняемые частицы

пробежали каждый оборот все быстрее и быстрее, а частота изменения ускоряющего поля, а значит, и время между нужными для разгона фазами оставались постоянными. Изменение поля как бы запаздывало, и ускорение частиц по мере разгона ослабевало. Для того чтобы частицы „крутились“ по окружности, надо было изменять не только электрическое, но и магнитное поле, и притом синхронно. Первый такой прибор создал американский физик Дональд Вильям Керст в 1940 г. Он применил его для ускорения бета-частиц и назвал поэтому **бетатроном**. Суффикс “-трон” стал общим для образования названий ускорителей атомных частиц. В бетатроне ускорение производилось электрическим полем, индуцированным [от лат. «индукцио» (*inductio*) - возбуждение] переменным магнитным полем. Но большие ускорения в нем получать было нельзя.

Первый бетатрон для ускорения электронов был построен в 1940 г. Д. Керстом. Бетатрон - это индукционный ускоритель, в котором электроны удерживаются на равновесной круговой орбите растущим синхронно с увеличением энергии магнитным полем. Ускорение происходит за счёт вихревого электрического поля создаваемого переменным магнитным потоком внутри равновесной орбиты. В бетатронах энергия ускоренных электронов может достигать сотни МэВ. Дальнейший рост энергии электронов ограничивается электромагнитным излучением. Наибольшее распространение получили бетатроны на энергию 20 - 50 МэВ.

В **синхротроне**, созданном в 1946 г., частицы вращались по окружности, как в бетатроне, но переменное ускоряющее электрическое поле создавалось самостоятельно, что позволяло получить большие скорости частиц. В следующем ускорителе, **синхроциклотроне** (от греч. “син”, “хронос” и “киклос”), или **фазотроне** [от греч. “фаза” (*phasa*) - проявление, определенный момент] частицы двигались по спирали, но зато могли получать большой разгон за счет повышения частоты ускоряющего электрического поля по мере увеличения скорости частиц. Они каждый раз попадали в нужную „фазу“ этого поля.

***Фазотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, дейтронов и др.), в котором управляющее магнитное поле постоянно во времени, а частота ускоряющего электрического поля меняется.*

Электроны высоких энергий получают в ускорителях двух типов
-электронных синхротронах.
-электронных линейных ускорителях.

В 1944-45 годах Э.М.Макмиллан и независимо от него В.И.Векслер открыли принцип автофазировки, что привело к появлению нового типа ускорителей - синхрофазотрона (от греч. «син», «хронос», «фаза», «трон»). В этом типе ускорителя частицы вращаются по окружности, а синхронное изменение частоты электрического и магнитного полей, так сказать «в такт» с изменением скорости частиц, позволяет получить самые высокие энергии. Разработка метода сильной фокусировки позволило ликвидировать оба недостатка циклотрона и получать уникальные по своим параметрам пучки (с малыми поперечными размерами, высокой интенсивностью, большими энергиями). Первые ускорители высоких энергий были построены в Дубне (ОИЯИ), вблизи Женевы (CERN) и Брукхевене (BNL).

***Синхрофазотрон** – ускоритель протонов с орбитой постоянного радиуса, растущим во времени магнитным полем, определяющим этот радиус, и переменной частотой ускоряющего электрического поля. Максимальная энергия протонов 800 ГэВ.*

В синхротронах ускоряемые частицы движутся в магнитном поле по постоянному радиусу. Частота ускоряющего поля тоже постоянна. В процессе ускорения увеличивается величина магнитного поля. Энергии электронов, полученные на синхротронах, составляют десятки ГэВ и ограничиваются синхротронным излучением электронов движущихся по круговой орбите. Для того чтобы избежать потерь энергии на синхротронное излучение строят линейные ускорители электронов длиной несколько км. Ускорение частиц в таких ускорителях достигается за счет того, что движущаяся частица попадает в ускоряющий зазор в ускоряющую фазу. Движение частицы синхронизировано так, чтобы время прохождения от одного ускоряющего

зазора до другого было кратно периоду ускоряющего поля. Первый синхрофазотрон был построен в 1952 г.

Самый большой линейный ускоритель электронов построен в Стэнфорде. Он имеет длину более 3 км и ускоряет электроны до энергии 20 ГэВ.

Для ускорения протонов высокой энергии используют протонные синхротроны. В протонных синхротронах частота ускоряющего напряжения увеличивается синхронно с величиной магнитного поля так, что протоны двигаются по круговой траектории постоянного радиуса. Преимуществом синхротронов является то, что в этих ускорителях магнитное поле создается в виде узкой кольцевой дорожки. В 1972 г. наибольшая энергия была получена на ускорителе ИФВЭ (Серпухов) - 76 ГэВ. В 1987 г. на протонном синхротроне лаборатории Э.Ферми (США) была получена энергия ~1000 ГэВ.

В таблице приведено несколько примеров ускорителей протонов и электронов с энергией больше 1 ГэВ. Во всех случаях за исключением ускорителя SLAC это синхротроны. Ускоритель SLAC является линейным ускорителем. В **Табл. 9** приведены типы ускоряемых частиц и энергии.

Табл. 9. Некоторые известные ускорители

Ускоритель	Ускоряемые частицы	Энергия пучка, ГэВ
КЕК , Tokyo	p	12
SLAC , Stanford	p	25
PS , CERN	e ⁻	28
ИФВЭ, Серпухов , Россия	p	76
SPS , CERN	p	450
Tevatron , Fermilab	p	1000

В этих ускорителях ускоряемый пучок падает на неподвижную мишень. Однако по мере увеличения энергии налетающих частиц все большая часть энергии пучка бесполезно расходуется на движение центра масс образующейся системы. Если же сталкиваются между собой два пучка этого можно избежать, так как при лобовом столкновении двух пучков частиц с одинаковыми массами и одинаковыми энергиями центр масс будет оставаться неподвижным. Однако, чтобы при этом сталкивающиеся пучки эффективно взаимодействовали, необходимо создать в области столкновения высокую плотность частиц. Ускорители такого типа были созданы и получили название ускорителей на встречных пучках или коллайдеров. Первые электронные коллайдеры были построены в 1965 году в ИЯФ (Новосибирск) и Стенфордской национальной лаборатории. В 1971 году был построен первый протонный коллайдер, а в 1985 году – протон-антипротонный коллайдер. Основной недостаток ускорителей на встречных пучках малая плотность сталкивающихся частиц по сравнению с ускорителями с неподвижной мишенью. На ускорителе HERA (Германия) сталкиваются встречные пучки электронов (позитронов) с энергией 30 ГэВ и протонов с энергией 820 ГэВ. Для повышения интенсивности сталкивающихся пучков используют накопительные кольца, в которых ускоренные пучки перед столкновением накапливаются в течение сотен циклов ускорения.

Современные ускорители - это комплексы, состоящие из нескольких ускорителей. На **Рис.9** показан ускорительный комплекс CERN, он носит название [LHC \(Large Hadron Collider\)](#), в котором планируется сталкивать протоны с суммарной энергией 14 ТэВ в системе центра масс. Предполагается также ускорять ядра свинца с суммарной энергией столкновения 1150 ТэВ. Кинетическая энергия летящего москита приблизительно 1 ТэВ.

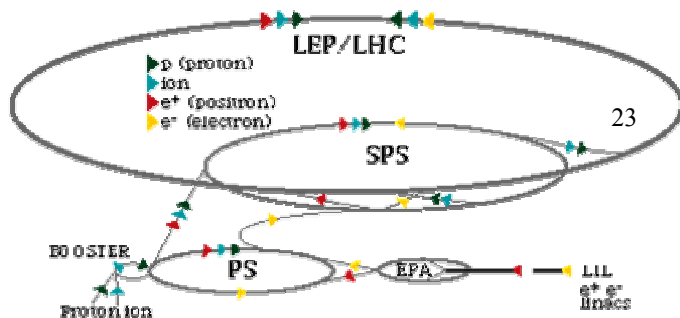


Рис. 9. Ускорительный комплекс ЦЕРНа

Протоны и ионы через накопительные кольца поступают в протонный синхротрон PS (26 ГэВ), который инжектирует протоны в протонный синхротрон SPS (450 ГэВ). Протоны из SPS будут поступать в LHC, где до недавнего времени ускорялись встречные пучки электронов и позитронов на установке LEP. В ускорителе LHC будут ускоряться протоны 7*7 ТэВ. Инжектором протонов является линейный ускоритель Proton ion linacs.

Одной из важных характеристик ускорителя является отношение длительности импульса излучения $t_{изл}$ к длительности интервала времени T между последовательными импульсами излучения. Ускорители, в которых $t_{изл} \ll T$ называются ускорителями с непрерывными пучками. На ускорителях с непрерывными пучками наиболее удобно проводить эксперименты, в которых необходимо регистрировать большое число частиц образующихся в одном цикле ускорения.

Основным элементом ускорителя электронов непрерывного действия СЕВАФ являются сверхпроводящие ускоряющие структуры (Рис.10). Электроны, испущенные инжектором с энергией 40 МэВ, ускоряются в двух линейных ускорителях, соединенных с обоих концов пятью поворотными арками.

Ускорение в каждом из линейных ускорителей обеспечивается 40 ниобиевыми ускоряющими структурами разделенными на 8 криомодулей, охлаждаемых жидким гелием. Ускоряющие структуры имеют минимальный градиент ускорения 5 МэВ на метр и частоту 1.5 ГГц. На каждом круге электроны получают ускорение около 800 МэВ, что позволяет достичь максимальной энергии пучка 6 ГэВ после пяти оборотов.

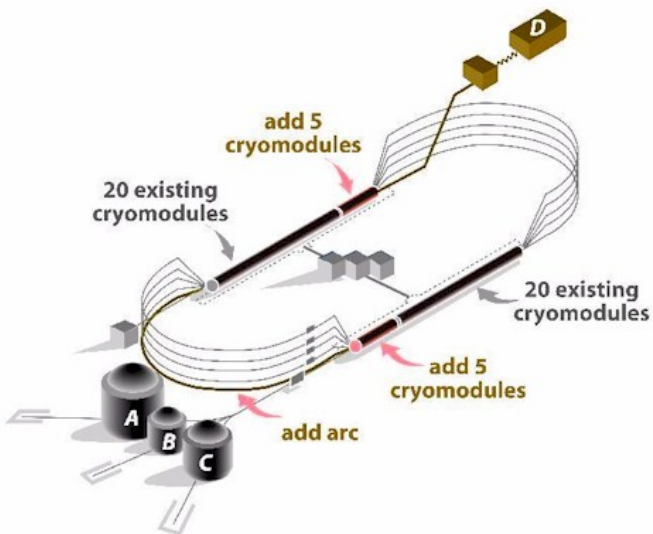


Рис.10 Схема ускорителя электронов непрерывного действия СЕВАФ

Пучок электронов одновременно доставляется в три экспериментальных зала А, В и С. Пучок состоит из микросгустков разделенных на 0.67 нс, которые могут быть ускорены до различных энергий проходя различное количество оборотов в ускорителе.

Таким образом, экспериментальные залы могут получать пучок с различными величинами энергии, кратными энергии получаемой за один оборот. Кроме того, сгустки могут иметь различную плотность электронов, что дает возможность доставлять в экспериментальные залы пучок с различными значениями тока. Ускоритель позволяет получать любые величины тока пучка в пределах от 100 нА до 100 мкА.

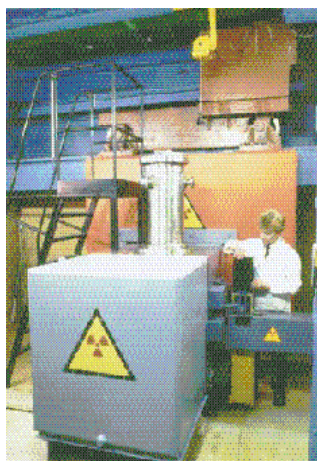


Рис.11 Лабораторный реактор АРГУС

5. ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

Реактор - устройство для осуществления управляемой цепной ядерной реакции с целью выработки тепловой энергии.

Ядерные реакторы, основанные на использовании энергии деления тяжелых ядер, являются мощными источниками гамма-излучения и нейтронов.

5.1 Реакторы – генераторы постоянных потоков нейтронов и гамма-излучения

Для целей радиационного материаловедения, медицины, сельского хозяйства обычно используют компактные реакторы с постоянным потоком нейтронов.

Типичным источником тепловых нейтронов является растворный мини-реактор АРГУС, разработанные и в ИАЭ и предназначенный для проведения лабораторных ядерно-физических анализов и методов контроля.

Саморегулирующийся растворный реактор – реактор максимальной безопасности, что обеспечивается высоким отрицательным коэффициентом реактивности и оптимальной концентрацией урана в растворе. Эти особенности обеспечивают режим саморегуляции установки. К преимуществам реактора относятся: гарантированная безопасность; простая и надежная конструкция; достаточно высокая плотность потока нейтронов; низкая стоимость; удобство обслуживания; малочисленность персонала. Реактор может быть установлен непосредственно в производственных помещениях. Области применения АРГУСа: элементарный анализ (1000 операций в день) с чувствительностью 10^{-6} - 10^{-9} г/г; производство ядерных фильтров; нейтронная дефектоскопия для контроля в реакторной и авиационной технике, в биологии, машиностроении и т.п. в случаях, когда применение рентгеновской дефектоскопии невозможно; производство короткоживущих радионуклидов для медицины, молекулярной биологии и пр.; обучение персонала ("АРГУС" наиболее удобен для этих целей, так как физические основы и конструкция обеспечивают полную безопасность при ошибочных действиях персонала).

Обогащение по изотопу урана-235, %	21
Загрузка урана-235, кг	1.8
Объем водного раствора $UO_2 SO_4$	23.0
Мощность, кВт,	не более 50
Плотность потока тепловых нейтронов, нейтр./см*см*с:	
в каналах активной зоны	$1.2 \cdot 10^{12}$
в каналах отражателя	$6 \cdot 10^{11}$
на выходе пучка нейтронов (при степени коллимации 1°)	$3 \cdot 10^7$

5.2 Импульсные реакторы

Мощными источниками нейтронов являются импульсные реакторы, предназначенные для физических исследований свойств атомного ядра и конденсированных сред.

Потребность современной науки в источниках нейтронов, как для научных исследований, так и для решения прикладных задач, постоянно растет. В особой цене источники с высокой плотностью потока нейтронов. В мире их мало, потому что сооружение современного нейтронного источника обходится очень дорого. Для примера: лет двадцать назад реакторов, специально предназначенных для физических исследований (то есть имеющих выведенные нейтронные пучки), было не больше 100, 25 из них обладали плотностью потока на уровне 10^{14} н/см² сек и лишь три (два в США и один во Франции) – плотностью потока 10^{15} н/см²/сек. В России были созданы такие импульсные ядерные реакторы самогасящегося действия, как БАРС, ЭБР, РУС с активными зонами из металлического урана, ЭЛИР, ИГРИК, ЯГУАР с активными зонами на основе растворов солей урана в воде, связанные импульсные реакторы ЭБР-200М+РУС, БАРС-5 и др.

Импульсные реакторы в первую очередь использовались для военных разработок. В них имитировалось воздействие ядерного взрыва на разного рода объекты, главным образом на военную технику, включая образцы ядерного оружия. Импульсные реакторы - это установки, которые постоянно работают в аварийных режимах. И этим они отличаются от энергетических, которые при выводе на определенную мощность должны работать устойчиво, стабильно. Импульсный же реактор действует короткое время, но на большой мощности. Впоследствии эти реакторы стали использовать для имитации аварийного процесса на обычных энергетических установках. Дело в том, что тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) ядерного реактора является ячейкой, в которой начинается развитие всех процессов генерации ядерной энергии в атомном реакторе, как в условиях нормальной эксплуатации, так и в переходных и аварийных режимах. Для изучения поведения ТВЭЛ в различных режимах новые возможности предоставило использование в этих целях импульсных ядерных реакторов.

Важное направление применения импульсных реакторов – активационный анализ, нейтронная спектроскопия, и нейтронография конденсированных сред.

Различают два типа импульсных реакторов: самогасящиеся (выгорание избыточного топлива) реакторы взрывного действия и периодические дисковые реакторы. Главная проблема **самогасящегося импульсного реактора** - тепловой удар, возникающий вследствие того, что тепловое расширение элементов активной зоны не успевает реализоваться за время нагрета (сжатая пружина). В металлических конструкциях активной зоны импульсного реактора на быстрых нейтронах в результате этого развиваются напряжения, достигающие предела прочности, что ограничивает энергию импульса. **Периодический импульсный реактор** (мигающий, пульсирующий) работает в режиме периодически повторяющихся импульсов мощности, которые инициируются и гасятся за счёт периодического движения части активной зоны, части отражателя либо замедлителя (модулятора реактивности). Периодические импульсные реакторы занимают промежуточное положение между самогасящимися Импульсными реакторами и обычными непрерывными реакторами. Они уступают первым по интенсивности импульсов и вторым по средней мощности, однако значительно превосходят последние по значению потока нейтронов в импульсе, а первые — по средней мощности.



Наиболее плотные изотропные потоки нейтронов можно получить в центре импульсных реакторов, механизм срабатывания которых очень напоминает взрыв атомной бомбы. В отличие от нее при достижении заданной мощности реактор сам себя гасит, не доводя процесс до разрушения конструкции. Такие реакторы были в свое время построены для совершенствования атомного оружия.

Рис.12. Реакторный зал ИГР

В 1961 на территории Семипалатинского ядерного полигона начала работать установка с высокотемпературным гомогенным ядерным реактором. ИГР - реактор взрывного действия, впоследствии его стали называть «импульсный графитовый реактор». Один из старейших в мире исследовательских реакторов, этот реактор ИГР и сегодня является уникальным источником нейтронного и гамма-излучения, отличающимися высокой динамикой изменения мощности.

С 1962 г. на реакторе ИГР проводятся исследования поведения топливных и конструкционных материалов перспективных реакторных установок, в том числе ЯРД - ядерного реакторного двигателя. Исследовательский реактор ИГР - импульсный реактор на тепловых нейтронах с **гомогенной** уран-графитовой активной зоной теплоемкостного типа. Высокая теплоемкость графита позволила обойтись без системы принудительного съема тепла, выделяющегося в процессе работы реактора в активной зоне. Отсутствие традиционного контура

теплоносителя существенным образом снижает риск радиационной аварии на реакторе. Ядерная безопасность реактора ИГР обусловлена значительным по величине отрицательным коэффициентом реактивности, обеспечивающим гарантированное гашение любого физически возможного импульса мощности, инициируемого вводом положительной реактивности посредством извлечения органов регулирования. Среди импульсных реакторов ИГР обладает самым высоким флюенсом тепловых нейтронов и интегральной дозой гамма-излучения в значительной по объему экспериментальной полости, имеющей диаметр 228 мм и высоту 3825 мм.

Табл.11 Технические характеристики реактора ИГР

Максимальная плотность потока нейтронов	7×10^{16} н/см ² ·с
Максимальный флюенс тепловых нейтронов	$3,7 \times 10^{16}$ н/см ²
Полуширина импульса минимальная	0,12 с

Мощным реактором взрывного типа является импульсный реактор ЯГУАР, который построен во ВНИИ технической физики в городе Снежинске (Челябинская обл.). В этом реакторе через центр активной зоны вертикально проходит труба, из которой откачан воздух. Уран-содержащая жидкость окружает со всех сторон эту трубу, и в момент импульса реактора излучает во все стороны огромное число нейтронов ($\sim 10^{18}$). Таким образом, максимальный поток нейтронов достигается в трубе в центре реактора, в объеме около 3 литров. Летящие навстречу друг другу с противоположных стенок активной зоны нейтроны сталкиваются в трубе и разлетаются во всех направлениях. Часть из них может беспрепятственно вылететь по трубе вдоль ее оси и попадает в детектор нейтронов, установленный на конце трубы. При этом очень важно, чтобы детектор нейтронов "не видел" напрямую стенок трубы, соприкасающихся с активной зоной реактора, от которых нейтроны могут непосредственно попасть в детектор. Поэтому надо очень точно выставить активную зону реактора и систему поглощающих кольцевых коллиматоров в трубе. Для примера здесь отметим, что поток нейтронов на детекторе от (n-n)-рассеяния в 10^{16} раз меньше, чем поток нейтронов от реактора без защиты. Рассеяние нейтронов на остаточном газе подавляется откачкой трубы до вакуума $\sim 10^{-7}$ торр. Для того, чтобы избавиться от огромного потока быстрых нейтронов во время вспышки реактора (с длительностью $\sim 10^{-3}$ секунды), которые мгновенно попадают в детектор, используется замедление нейтронов в полиэтиленовом блоке, помещенном в активную зону у стенок трубы. Рассеянные друг на друге тепловые нейтроны движутся медленно по трубе и прилетают к детектору через $\sim 5 \times 10^{-3}$ секунды после вспышки реактора. К этому моменту реактор уже заглушен, и фон от быстрых нейтронов его активной зоны достаточно (в $10^4 - 10^5$ раз) подавлен. Чтобы выделить из общего счета детектора только те нейтроны, которые рассеялись друг на друге, реактор делает несколько вспышек разной мощности и из общего счета детектора нейтронов выделяется только та часть, которая зависит от квадрата мощности (интенсивности потока) отдельных вспышек реактора. Реакторы подобного типа используются для прямого измерения длины рассеяния нейтрона на нейтроне.

В дисковом реакторе основная деталь - диск с плутониевым вкладышем, вращается с большой частотой, рядом с диском расположены два "куска" оксида плутония - при прохождении между ними вкладыша достигается критическая масса и происходит импульсная ядерная реакция. Полученные нейтроны разводят по нейтроноводам для использования в научных целях монохроматических потоков быстрых нейтронов. Идея пульсирующего ядерного реактора в 1955 предложена Д. И. Блохинцевым.

Летом 1960 года в Объединенном институте прошли первые испытания новой установки - импульсного реактора ИБР. Это - единственный в мире источник нейтронов, в котором периодический режим испускания этих ядерных частиц был реализован за счет использования подвижной части активной зоны, вращавшейся между двумя неподвижными частями. Иное техническое решение реализовано при создании второго импульсного реактора (ИБР-2),

построенного в Дубне в 1984 г. В нем вблизи активной зоны вращается отражатель нейтронов, что вызывает импульсы из-за изменения количества нейтронов в этой зоне. Спустя некоторое время стало ясно, что для ряда исследовательских задач ядерной физики первый реактор имеет слишком длинный нейтронный импульс. В 1968 году ИБР был модернизирован. Его мощность увеличилась в 30 раз (ИБР превратился в нейтронный бустер ИБР-30) благодаря тому, что к нему был присоединен ускоритель электронов, пучок которых, впрыскиваемый в центр активной зоны реактора, формирует нейтронный импульс. В такой системе коэффициент размножения нейтронов может изменяться от 16 до 1000 - это уникально гибкие возможности нейтронного источника. Особо надо подчеркнуть экономичность импульсных реакторов: ИБР-30 при средней мощности 10 кВт дает импульсы максимальной мощности 60 МВт, у ИБР-2 средняя мощность 2 МВт, импульсная - 1500 МВт.



Рис.13 Реактор ИБР

ИБР-2 - эффективный инструмент нейтронных исследований. Средняя мощность реактора невелика, всего 2 МВт, поэтому он исключительно экономичен и надежен. Зато параметры импульсного нейтронного пучка на выходе достаточно хорошие: мощность нейтронного импульса составляет 1500 МВт, длительность импульса - 220 микросекунд, а частота их следования - 5 импульсов в секунду. Поток нейтронов в импульсе составляет 10^{16} частиц на см^2 в сек. Он дает импульс 10^{16} н/см² сек., но его средний во времени поток составляет только 10^{13} н/см² сек. Хотя такого потока не могут добиться даже стационарные реакторы мощностью в 50-100 МВт, этого уже недостаточно для проведения широкого класса экспериментов. Реактор окружают разного рода спектрометры. Двенадцать таких устройств, включающих дифрактометры, рефлектометры, спектрометры малоуглового рассеяния, неупругого рассеяния и другие, установлены по периметру ИБР-2, куда веером от сердца реактора расходятся 14 пульсирующих потоков нейтронов. В настоящее время в ОИЯИ создается источник резонансных нейтронов ИРЕН. Энергия взаимодействия нейтрона с ядром определяется с использованием методики времени пролета. Ясно, что это время не может быть измерено точнее, чем продолжительность импульса. У первого ИБРа длительность нейтронного импульса составляла 30 микросекунд - точность измерения времени и соответственно энергии ограничивалась этой величиной. ИРЕН будет иметь длительность вспышек около 400 наносекунд. Это примерно в 100 раз лучше (то есть короче), соответственно повышается и точность измерений. Точное измерение энергии резонансных нейтронов дает возможность изучать свойства отдельных возбужденных состояний ядер, энергетическое расстояние между которыми меньше одного электронвольта. Таким образом, можно изучать свойства тяжелых ядер (их распад, различные каналы протекания реакции и т.д.) в условиях, которых нельзя достичь другими методами.

Результаты изучения этих состояний позволяют делать выводы для фундаментальной ядерной физики, теории квантового хаоса и многих других актуальных научных направлений. С помощью мощных импульсов нейтронов можно исследовать твердые тела и жидкости и изучать процессы в динамическом режиме. Поэтому импульсные реакторы используются во многих научных и технических приложениях (разработка новых безопасных ядерных реакторов, создание трансмутаторов - установок для переработки ядерных отходов и т.п.) Одна из традиционных областей применения ИБРов - материаловедение, изучение свойств новых материалов, в том числе конструкционных и сверхпроводящих. Большой интерес практиков вызывает изучение пленочных покрытий: с помощью нейтронов, например, можно "увидеть", что происходит на границе между материалом и покрывающей его пленкой. С помощью импульсов нейтронов удалось выяснить, как меняется структура покрытия на скоростных магистралях Германии. Исследован высокотемпературный синтез материалов в реальном времени, изучены

деформации и напряжения в материалах, используемых в конструкциях различных реакторов, изучена структура рибосом и полимерных молекул, магнитных и сверхпроводящих пленок и т.п. Все более широким становится применение нейтронов в таких областях, как геология, химия, науки о Земле. Целую отрасль сегодня составляет исследование текстур - пространственных свойств геологических пород. Так, изучение с помощью нейтронов пород, извлеченных с 10-километровой глубины на севере Кольского полуострова стало важной вехой в геологии. А



изучение магнитной структуры этих пород дало уникальные сведения о прошлом магнитного поля Земли. Свои области исследований с помощью нейтронов сформировались в биологии, фармацевтике, медицине, экологии. В качестве примеров можно упомянуть построение карт загрязнения почвы тяжелыми металлами и радионуклидами и мониторинг содержания нежелательных металлов.

Рис.14 Импульсный реактор БИГР.

Тепловыделяющие элементы являются ячейкой, в которой начинается развитие всех процессов генерации ядерной энергии в атомном реакторе, как в условиях нормальной эксплуатации, так и в переходных и аварийных режимах. Для изучения поведения ТВЭЛ в различных режимах новые возможности предоставило использование импульсного реактора на замедленных нейтронах ВИР-2 с активной зоной из раствора соли UO_2SO_4 , являющийся по своим характеристикам аналогом реактора типа ACRR (СНЛ, США).

Характеризуемая величина	ВИР-2М	БИГР	МИРТ
Начало эксплуатации, год	1971	1977	Проект
Рабочая загрузка U-235, 90%, кг	8	400	40
Энерговыведение в номинальном импульсе, МДж	80	300	3000
Полуширина импульса мощности, сек	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Флюенс нейтронов Н/см ²	во внутреннем канале	$7 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{16}$
	на боковой поверхности	$1,5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$

В настоящее время (2004) Россия располагает самым мощным в мире импульсным графитовым реактором на быстрых нейтронах БИГР с керамической активной зоной самогасящегося действия. БИГР совместно с ускорителями заряженных частиц позволяет моделировать воздействие на различные виды военной техники, включая образцы ядерного оружия, отдельных поражающих факторов ядерного взрыва, так и комплексное их воздействие. Реактор БИГР позволяет генерировать газ ультрахолодных нейтронов.

Реактор БИГР (быстрый импульсный графитовый реактор) является единственным в мире представителем импульсных реакторов самогасящего действия на быстрых нейтронах, активная зона которого выполнена из дисперсионного уран-графитового топлива. Импульсный реактор МИРТ предполагается использовать для моделирования реактивных аварий в моделях ядерных энергетических установок, находящихся в состоянии близком к критическому. Этим он качественно отличается от ВИР-2М и БИГР, на которых возможны эксперименты только с фрагментами одиночных ТВЭЛ ограниченной длины или моделями топливных сборок с небольшим числом топливных элементов.

Испытания при воздействии мощных импульсов нейтронов на конструкционные материалы проводятся с использованием импульсного двухзонного твердотопливного ядерного реактора на быстрых нейтронах БАРС-4.

Табл.13 Параметры импульсного ядерного реактора БАРС-4 (Лыткарино, МО)

Длительность импульса	60 мкс
Число делений за импульс	До $2 \cdot 10^{17}$
Флюенс нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) за импульс в центральном канале	До 10^{15} см ⁻²
Доза гамма-излучения за импульс	До $5 \cdot 10^5$ Р
Средняя энергия нейтронов	1,4 МэВ
Плотность потока нейтронов в статическом режиме	До $2 \cdot 10^{11}$ см ⁻² ·с ⁻¹

В последнее время импульсные реакторы типа БАРС находят применение в качестве источников энергии для накачки мощных лазеров. ОКУЯН - лазерная установка с накачкой от импульсного реактора - является прототипом мощных энергетических лазерных систем XXI века, которые найдут применение в энергетике (лазерный термоядерный синтез), технологии (глубокая сварка, пайка), космонавтике (дистанционное энергоснабжение космических кораблей, лазерное реактивное движение). Перспективность разработки лазеров с прямой ядерной накачкой определяется уникальными свойствами источника накачки: высокой энергоемкостью, автономностью, компактностью, возможностью накачки больших объемов активных сред, высокой надежностью. Энергетическая модель оптического квантового усилителя с ядерной накачкой ОКУЯН состоит из реакторного (запального) и лазерного блоков. Реакторный блок - двухзонный импульсный реактор на быстрых нейтронах самогасящегося действия БАРС-6 (число делений - 5×10^{17} , длительность импульса на половине высоты - 40 мкс). Лазерный блок диаметром 1.7 м и длиной 2.5 м - бустерная подкритическая зона с $K_{эф}$, близким к единице, включает 103 лазерно-активных элементов, элементы замедлителя и отражателя нейтронов. В оптической схеме используется принцип "задающий генератор-двух-проходный усилитель", в качестве задающего генератора используется импульсный лазер с накачкой электронным пучком.

Ожидаемая максимальная энергия лазерного излучения на переходе атома ксенона с длиной волны $L = 1.73$ мкм составляет 50 кДж при длительности импульса 2-10 мс.

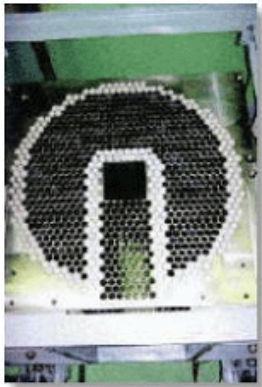


Рис.15 ОКУЯН - лазерная установка с накачкой от импульсного реактора (Обнинск).

В настоящее время российские ученые, занимающиеся нейтронными исследованиями, связывают свои надежды со строящимся в Гатчине мощным высокопоточным исследовательским реактором ПИК (Пучковый, Исследовательский, Корпусной). При полной реализации проекта ПИК способен обеспечить потребности в стационарном потоке нейтронов всех заинтересованных пользователей в России.