

ВВЕДЕНИЕ

Все живые существа – микроорганизмы, растения, животные и человек подвергаются воздействию различных излучений; часть из них необходима для развития и существования организма, часть – наносит ему больший или меньший вред.

Самым мощным источником излучения является Солнце. Солнце испускает почти все виды излучений: радиоволны, тепловое излучение, световые и ультрафиолетовые лучи, а также волновое (электромагнитные) и корпускулярные излучения больших энергий. Энергетический баланс Земли определяется солнечным излучением.

Для живых существ необходимы следующие виды **солнечного излучения**: тепловое, световое, ультрафиолетовое. Остальные имеют второстепенное значение. Биологическое действие солнечного излучения определяется следующей закономерностью: естественные дозы излучения способствуют течению жизненных процессов, т. е. поддержанию жизни, в противоположность этому, переоблучения следует считать бесполезными или вредными. Это правило можно обосновать многими данными, однако безоговорочно перенести его на излучения большой энергии нельзя.

Следующим источником радиации являются **естественные радионуклиды**, находящиеся в земной коре и испускающие биологически активные излучения очень больших энергий.

Третьим источником естественного излучения являются **космические лучи** чрезвычайно большой энергии. Прошрое столетие принесло существенные изменения, появился новый фактор: возможность дополнительного облучения, которое по своим размерам превышает естественное. В связи с этим проблема защиты от радиации приобрела особо большое значение, и особенно после Чернобыльской катастрофы.

Дозиметрия ионизирующих излучений – самостоятельный раздел прикладной ядерной физики, в котором рассматриваются свойства ионизирующих излучений, физические величины, характеризующие поле излучения или взаимодействие излучения с веществом, а также принципы и методы определения этих величин.

Дозиметрия имеет дело с такими физическими величинами, которые связаны с ожидаемым радиационным эффектом. Эти величины обычно называют дозиметрическими. Установленная связь между измеряемой физической величиной и ожидаемым радиационным эффектом – важнейшее свойство дозиметрических величин. Вне этой связи дозиметрические измерения теряют смысл.

Первопричиной радиационных эффектов является поглощение энергии излучения облучаемым объектом, и доза как мера поглощенной энергии оказывается основной дозиметрической величиной.

Важнейшая задача дозиметрии – определение дозы излучения в различных средах и особенно в тканях живого организма. Для этой цели используют различные расчетные и экспериментальные методы.

Количественное определение дозы излучения, действующей на живой организм, необходимо прежде всего для выявления, оценки и предупреждения возможной радиационной опасности для человека. Если врачи-гигиенисты и радиобиологи должны ответить на вопрос, каковы предельно допустимые с точки зрения биологической опасности уровни излучения, то физики-дозиметристы должны обеспечить правильное измерение этих уровней. Развитие дозиметрии первоначально целиком определялось необходимостью защиты человека от вредного воздействия ионизирующих излучений. Вскоре после открытия рентгеновского излучения (1895 г.) было обнаружено его вредное действие на человека и возникла необходимость в количественной оценке степени радиационной опасности. Для измерения интенсивности рентгеновского излучения начали использовать фотографический эффект, флюоресценцию, тепловой эффект, а также химические методы. В дальнейшем измерения физических величин, характеризующих рентгеновское излучение и его взаимодействие со средой, выделились в самостоятельную

область – **рентгенометрию**, являющуюся теперь составной частью дозиметрии ионизирующих излучений. В рентгенометрии определились основные величины, подлежащие измерению, и сформировались почти все методы современной дозиметрии.

Не будет преувеличением сказать, что в развитии рентгенометрии советским ученым принадлежит ведущая роль. В 1924 г. П. И. Лукирский провел анализ возможностей ионизационных измерений. Работы П. И. Лукирского, а также Д. Н. Наследова и В. М. Ду-кельского явились серьезным вкладом в установление ионизационной единицы дозы рентгеновского излучения. В 1928 г. эта единица, получившая название «рентген», была рекомендована на Втором международном конгрессе радиологов как основная единица дозы.

В 30-х годах 20 века И. В. Поройков разработал и создал групповой эталон рентгена, обеспечивший прецизионное измерение дозы рентгеновского излучения средней жесткости. В 1934 г. был принят ОСТ ВКС 7623 на единицы рентгеновского излучения, устанавливающий единицу рентген, разработанную И. В. Поройковым. Этим в СССР было положено начало единству измерений ионизирующих излучений. Большой вклад в дальнейшее развитие теоретической и экспериментальной рентгенометрии внесли К. К. Аглинцев, А. Н. Кронгауз, И. В. Поройков, М. Ф. Юдин. Фундаментальные работы К. К. Аглинцева и И. В. Поройкова стали настольными книгами дозиметристов.

До 1942 г. дозиметрия обслуживала в основном медиков-радиологов. В 1942 г. был пущен первый ядерный реактор; с этого времени начались усиленные работы в области ядерной техники, организовалось широкое производство радиоактивных нуклидов. Вопросы радиационной безопасности стали приобретать огромное значение, затрагивая интересы как работников атомной промышленности, так и широких слоев населения. Постепенно дозиметрия становится нужной не только физикам и медикам, но и биологам, химикам, работникам промышленности и сельского хозяйства, связанным с использованием ионизирующих излучений.

Круг задач, решаемых дозиметрией, непрерывно расширяется. Если первоначальной ее задачей было в основном обеспечение радиационной безопасности, то сейчас все большее значение приобретает дозиметрия в радиационно-физических, радиационно-химических и радиобиологических исследованиях; новые требования к дозиметрии предъявляет радиационная технология. Без грамотного, научно обоснованного дозиметрического обеспечения невозможно эффективное применение ионизирующих излучений и радионуклидов в медицине, сельском хозяйстве и промышленности.

Важный аспект приложений дозиметрии – охрана окружающей природной среды, неотъемлемым компонентом которой являются радиационные поля и рассеянные радионуклиды естественного и искусственного происхождения. Дозиметрический контроль окружающей среды и связанные с ним прогнозы радиационной обстановки требуют создания оптимизированных дозиметрических систем, развития новых методов дозиметрии, решения вопросов, связанных с определением необходимого объема и точности дозиметрической информации.

Успехи дозиметрии предопределяются новыми идеями, научными и практическими разработками. В этой связи уместно назвать Н.Г. Гусева, Б.М. Исаева, И.Б. Кенрим-Маркуса, О.И. Лейпунского, Ю.В. Сибинцева, А.Д. Туркина, широко известных своими трудами в области дозиметрии.

С пуском мощных ускорительных установок возникли новые проблемы в дозиметрии, связанные с измерением излучений, состоящих из частиц очень высоких энергий. Освоение космического пространства и развитие космической медицины невозможны без совершенствования методов измерения дозы ионизирующих излучений, распространяющихся в космосе. Объем задач, решаемых дозиметрией в настоящее время, настолько велик, что их трудно перечислить в кратком введении. Техническими средствами дозиметрии являются приборы для измерений ионизирующих излучений.

Техника дозиметрических измерений интенсивно развивается в наши дни.

Важный раздел дозиметрии – **метрология ионизирующих излучений** – призван обеспечивать стандартизацию измерений в области ионизирующих излучений и радиоактивности. Метрология требует разработки прецизионных и воспроизводимых методов измерения. Однако специфика предмета измерения (ионизирующие излучения) оказывает влияние на точность дозиметрических методов. Никого не удивит возможность простым способом измерить разность потенциалов с точностью до десятых долей процента. Если вольтметр, измеряющий электрическое напряжение, дает показания с погрешностью 5%, то в большинстве случаев мы считаем его плохим прибором. Совсем другие подходы к оценке измерительной техники в дозиметрии. Прецизионные методы измерения в дозиметрии в некоторых случаях позволяют получить погрешность в доли процента. Вместе с тем в большинстве дозиметрических методов погрешность, оцениваемая десятками процентов, считается вполне удовлетворительной. Следует оговориться, что удовлетворение в данном случае обусловлено не отсутствием необходимости в повышении точности измерения, а ограниченностью возможностей измерительных методов. Повышение точности измерений – важнейшая цель совершенствования методов и средств дозиметрии.

Дозиметрические измерения направлены на то, чтобы дать количественную оценку эффекта воздействия ионизирующих излучений на облучаемый объект. Однако во многих случаях нет простой связи между величиной поглощенной энергии излучения и величиной наблюдаемого эффекта. Знание величины дозы оказывается недостаточным для предсказания радиационного эффекта, который определяется также пространственным распределением поглощенной энергии по облучаемому объекту, фактором времени, видом и энергией ионизирующего излучения. Возникает необходимость в комплексном измерении нескольких взаимозависимых физических величин, определенная комбинация которых могла бы быть связана с ожидаемым радиационным эффектом. Эту связь нельзя установить без понимания механизмов радиационных эффектов. Таким образом, дозиметрия смыкается с радиационной физикой.

Наряду с экспериментальными методами, в дозиметрии широко используют расчетные методы определения дозиметрических величин, основанные на законах взаимодействия излучений с веществом.

Дозиметрия ионизирующих излучений – прикладная наука, однако ее приложения столь многообразны и нестандартны, что требуются постоянные поиски новых методов и средств дозиметрии, основанные на глубоком понимании физики излучений и явлений, связанных с взаимодействием излучений с веществом. Все это делает дозиметрию увлекательной областью знаний, требующей творческого подхода и применения научного метода исследования.

Систематика задач дозиметрии. Выделим некоторый объем вещества, изменения в котором, происходящие под действием ионизирующего излучения, определяют наблюдаемый радиационный эффект. Рассмотрим последовательность процессов, приводящих к эффекту, количественную меру которого обозначим символом (η), (Рис.1):

Характеристики поля излучения, действующего на вещество, можно считать известными, если задана функция распределения плотности потока частиц или квантов Φ (r , E , Ω). Взаимодействуя с веществом, частицы теряют свою энергию. Этот процесс можно охарактеризовать сечениями взаимодействия (коэффициент ослабления μ) и тормозной способностью вещества dE/dx .

Потерянная энергия в общем случае не равна энергии, переданной веществу; процесс передачи энергии характеризуется коэффициентом передачи энергии (μ_r) и ЛПЭ – линейной передачи энергии (L), а количественной мерой переданной энергии может служить **керма (K)**. Переданная энергия в пределах выбранного объема вещества не обязательно равна поглощенной энергии излучения, количественно выраженной **дозой (D)**. Поглощенная энергия является первопричиной всех последующих процессов, на

рисунке обозначены лишь первичные процессы, к которым прежде всего следует отнести ионизацию и возбуждение атомов среды.

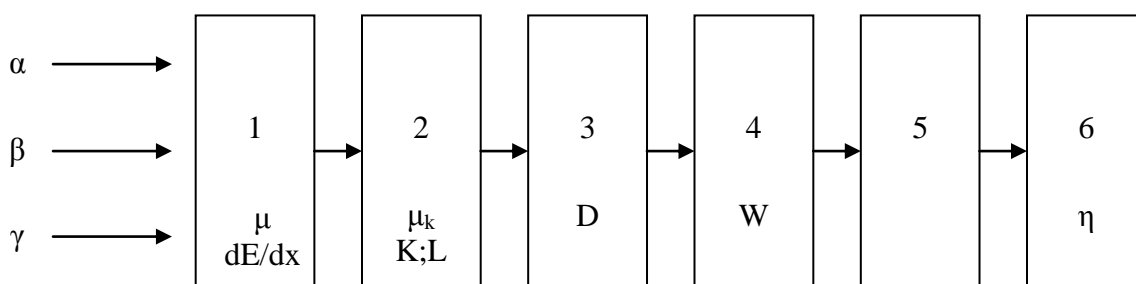


Рис. 1. Систематика задач дозиметрии.

1 – потеря энергии, 2 – передача энергии, 3 – поглощение энергии,
4 – первичные процессы, 5 – промежуточные, 6 – биологический эффект.

Одной из характеристик процесса ионизации является средняя энергия ионообразования. Вслед за этим возможна сложная цепочка физических, химических и биологических процессов, приводящих к наблюдаемому эффекту (η). Эти процессы не всегда известны и их точное описание часто оказывается невозможным. Одной из важнейших задач, связанных с воздействием излучения на объекты живой и неживой природы, является установление связи между измеряемыми физическими величинами и наблюдаемым радиационным эффектом:

$$\eta = F(Q),$$

где $F(Q)$ есть некоторая функция одной физической величины или комбинации нескольких физических величин, характеризующих поле излучения или взаимодействие излучения с веществом. Под (Q) можно понимать одну или несколько величин, указанных на рисунке 1.

Измерение физических величин в целях предсказания радиационных эффектов и есть основная задача дозиметрии ионизирующих излучений.

Функциональная зависимость $\eta = F(Q)$ лежит в основе любых дозиметрических измерений, выбор величины Q определяется конкретными задачами.

Основные международные организации по радиологической защите. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), именуемая далее Комиссия, была организована в 1928 г. в соответствии с решением Второго Международного конгресса по радиологии и называлась Международным комитетом по защите от рентгеновского излучения и излучения радия (МКЗРИР). В 1950 г. она была реорганизована и переименована. Комиссия еще сохраняет особую связь с проходящими один раз в четыре года заседаниями Конгресса и международным обществом радиологов, но по прошествии нескольких лет ее интересы сильно расширились с учетом возрастающего использования ионизирующих излучений и деятельности, связанной с генерированием излучения и созданием радиоактивных веществ.

Комиссия работает в тесном контакте с родственным органом – Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям, официально связана с Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ). Она также имеет важные связи с Международной организацией труда и другими учреждениями Организации Объединенных Наций, включая Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и Программу ООН по окружающей среде, а также с Комиссией Европейских сообществ. Агентством по ядерной энергии Организации по экономическому сотрудничеству и развитию, Международной организацией стандартов, Международной электротехнической комиссией и Международной ассоциацией по радиационной защите. Она учитывает успехи ведущих национальных организаций.

Первый доклад Комиссии был выпущен в 1928 г. Первый доклад текущей серии,

озаглавленный Публикация 1 (1959 г.), содержал рекомендации, одобренные в сентябре 1958 г. Далее появились общие рекомендации в виде Публикации 6 (1964 г.), Публикации 9 (1966 г.) и Публикации 26 (1977 г.). Публикация 26 была откорректирована и расширена заявлением 1978 г. и последующими заявлениями (1980, 1983, 1984, 1985, 1987 гг.). Доклады по более узким специальным темам появились в виде дальнейших публикаций под последующими номерами.

За последние десятилетия метод работы Комиссии практически не изменялся. Поскольку на уровне годовой дозы, соответствующей рекомендованным Комиссией пределам, или ниже ее имеется мало прямых доказательств вреда для здоровья, требуется тщательное научное обоснование вероятности вреда, связанного с малыми дозами. Большая часть результатов наблюдений была получена при больших дозах и обычно при большой мощности дозы. Цель Комиссии состоит в том, чтобы на основе широкого спектра экспертных оценок как других организаций, так и собственных Комитетов и рабочих групп достичь разумного согласия относительно последствий воздействия излучения. Комиссия считает неприемлемым использовать ни самое пессимистическое, ни самое оптимистическое толкование имеющихся данных, но ставит целью избежать недооценки последствий облучения. Оценка этих последствий неизбежно включает социальные и экономические аспекты, а также научные представления многих дисциплин. Комиссия считает своей целью создание как можно более ясной основы для таких решений и признает, что другие могут прийти к своим собственным выводам по многим спорным вопросам.

Комиссия констатировала, что ее рекомендации использовались и регулирующими органами, и органами управления, и их консультантами-специалистами. Поскольку рекомендации Комиссии могут быть применены для различных ситуаций, степень их детализации намеренно ограничена. Однако Комиссия исторически связана с медицинской радиологией, и ее рекомендации в этой области часто довольно подробны.

Рекомендации Комиссии помогли обеспечить единую основу для национальных и региональных регламентирующих норм. Со своей стороны Комиссия заинтересована в сохранении стабильности рекомендаций. Она полагает, что частые изменения могут лишь привести к путанице. Ежегодно Комиссия рассматривает новые опубликованные данные на фоне гораздо большего количества уже накопленных данных. Маловероятно, чтобы эти обзоры привели к драматическим изменениям, но если новые данные покажут, что существующие рекомендации настоятельно нуждаются в изменениях, то Комиссия быстро на это отреагирует.

За последние десятилетия произошли существенные изменения в акцентах представления и применения системы безопасности, предлагаемой Комиссией. Первоначально и в 50-е годы существовала тенденция рассматривать соблюдение пределов индивидуальных доз в качестве меры ее успешного выполнения. Рекомендовали удерживать все виды облучения на возможно низком уровне, но это не всегда применялось осознанно. В дальнейшем значительный упор был сделан на требовании удерживать все облучения «на столь низких уровнях, какие только можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов». Это привело к существенному снижению индивидуальных доз и значительно сократило число ситуаций, при которых пределы дозы играют основную роль в общей системе безопасности. Смысл пределов дозы, рекомендованных Комиссией, также изменился. Первоначально их основной целью было устранить непосредственно наблюдаемые незлокачественные эффекты облучения. Впоследствии их устанавливали также с намерением ограничить возникновение рака и наследуемых эффектов, вызванных облучением.

Сфера деятельности МКРЕ. Основной целью Международной Комиссией по Радиационным Единицам и Измерениям (МКРЕ), начиная со времени ее образования в 1925, является развитие международно приемлемых рекомендаций относительно:

– величин и единиц радиоактивного излучения и радиоактивности,

- методик, подходящих для измерения и применения этих величин в медицинской радиологии и радиобиологии,
- физических данных необходимых для применения этих методик, использование которых служит для установления единообразия в докладах.

Комиссия также рассматривает и дает подобные типы рекомендаций в области защиты от излучения. В этой связи, работа МКРЕ тесно связана с работой Международной Комиссии по Радиологической защите (МКРЗ).

Политика МКРЕ. МКРЕ стремится собрать и оценить самые последние данные и информацию по проблеме измерения ионизирующих излучений и дозиметрии, и дать рекомендации по наиболее приемлемым значениям и техническим средствам для данного использования. Рекомендации Комиссии постоянно пересматриваются, чтобы не отстать от быстро расширяющихся использований излучения.

МКРЕ считает, что ответственность за представление своих собственных подробных методик для развития и эксплуатации образцов лежит на национальных организациях. Однако, она убеждена, что все страны должны придерживаться настолько близко насколько возможно международно-рекомендованных основных концепций радиационных величин и единиц.

Комиссия считает, что ее ответственность заключается в развитии системы величин и единиц, имеющих самый широкий диапазон применимости. Иногда могут возникнуть ситуации, когда целесообразное решение данной проблемы может казаться желательным. Вообще говоря, Комиссия считает, что деятельность, основанная на целесообразности нежелательна с точки зрения долгосрочности; она стремится базировать свое решение на ожидаемых долгосрочных преимуществах. Комиссия разделила область своих интересов на двенадцать технических областей и назначила одного или более членов Комиссии ответственными за идентификацию потенциальных тем для новой деятельности МКРЕ в каждой области. Каждая область периодически рассматривается ее спонсорами. Рекомендации для новых докладов тогда рассматриваются Комиссией и расставляются приоритеты. Технические отделы: лучевая терапия; диагностическая радиология (рентгенология); ядерная медицина; радиобиология; радиоактивность; физика излучений – рентгеновское излучение, гамма излучение и электроны; физика излучений – нейтроны и тяжелые частицы; защита от излучения; радиационная химия; критические данные; теоретические аспекты; величины и единицы.

В дополнение к ее близким отношениям с Международной Комиссией по Радиологической защите (МКРЗ), МКРЕ развила отношения с другим организациями, заинтересованными проблемами радиационных величин, единиц и измерений. С 1955, МКРЕ начала официальные отношения с Всемирной Организацией Здравоохранения (ВОЗ) посредством чего к МКРЕ обращаются для первичного руководства в вопросах радиационных единиц и измерений и, в свою очередь, ВОЗ помогает в распространении рекомендаций Комиссии по всему миру. В 1960, МКРЕ вступила в консультативный статус с Международным Агентством по Атомной Энергии. Комиссия имеет официальные отношения с Научным Комитетом по Действию Атомной Радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН).

РАЗДЕЛ 1. ПОЛЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. Основные типы полей ионизирующего излучения

Под ионизирующим излучением понимают любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию электрических зарядов (ионов) разных знаков.

Ионизирующее излучение представляет собой **поток заряженных и (или)**

незаряженных частиц. Говоря о взаимодействии излучения со средой, мы имеем в виду взаимодействие этих частиц с веществом среды, в которой распространяется излучение. Различают **непосредственно ионизирующее излучение** и **косвенно ионизирующее излучение**.

Непосредственно ионизирующее излучение состоит из заряженных частиц, кинетическая энергия которых достаточна для ионизации при столкновении с атомами вещества. Примером этому могут быть альфа - и бета-излучения радиоактивных нуклидов, протонное излучение ускорителей и т. п.

Косвенно ионизирующее излучение состоит из незаряженных (нейтральных) частиц, взаимодействие которых со средой приводит к возникновению заряженных частиц, способных непосредственно вызывать ионизацию и (или) вызвать ядерные превращения. Примерами косвенно ионизирующего излучения могут служить нейтронное излучение, представляющее собой поток нейтронов, и фотонное излучение, представляющее собой электромагнитное ионизирующее излучение.

Фотонное излучение – электромагнитное косвенно ионизирующее излучение.

Гамма-излучение – фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или аннигиляции частиц.

Тормозное излучение – фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц.

Характеристическое излучение – фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома.

Рентгеновское излучение – фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучений с энергией менее 250 кэВ.

Ионизирующее излучение, состоящее из частиц одного вида одинаковой энергии, называется **моноэнергетическим** излучением.

Ионизирующее излучение, состоящее из частиц одного вида различных энергий, называется **немоноэнергетическим** излучением. Так, бета-излучение радиоактивных нуклидов всегда является немонаэнергетическим, так как оно состоит из бета-частиц различных энергий. Немонаэнергетическим является тормозное излучение; в то же время легко получить моноэнергетическое характеристическое излучение.

Излучение, состоящее из частиц различного вида, называют **смешанным**.

В зависимости от характера распространения в пространстве различают направленное и ненаправленное излучение. **Направленным** называется излучение с выделенным направлением распространения. Это надо понимать таким образом, что в рассматриваемую точку пространства излучение приходит только по одному направлению. Например, излучение одного точечного источника в вакууме и коллимированный пучок излучения от ускорителя в вакууме являются направленными излучениями. Если бы эти излучения распространялись не в вакууме, а в рассеивающей среде, то, строго говоря, мы имели бы дело с ненаправленными излучениями, поскольку рассеянное излучение приходило бы в рассматриваемую точку по различным направлениям. Если рассматривать не один, а два точечных источника, не находящихся на одной линии с точкой наблюдения, то излучение в эту точку в вакууме будет проходить по двум направлениям, и его нельзя считать направленным.

У ненаправленного излучения иногда можно выделить преимущественное направление распространения. В частном случае симметричного относительно точки наблюдения расположения точечных источников одинаковой мощности можно выделить несколько равноценных преимущественных направлений. Однако если такие источники достаточно плотно и равномерно распределены по пространству, то все направления распространения излучения становятся равноценными. В этом случае говорят, что излучение **изотропно**. У изотропного излучения не удастся выделить преимущественного направления распространения.

Излучение распространяется в пространстве и во времени. В зависимости от характера распространения во времени различают непрерывное и импульсное излучения. Это два крайних случая поведения излучения во времени.

Излучение считается **непрерывным**, если его характеристики за рассматриваемый промежуток времени остаются постоянными. Однако за время наблюдения характеристики излучения могут изменяться.

Под **импульсным** понимается такое излучение, продолжительность действия которого значительно меньше времени наблюдения. Неопределенность критерия «значительно меньше» снимается в каждом конкретном случае.

Под **полем излучения** в дозиметрии понимают область пространства, каждой точке которой поставлены в соответствие физические величины (скалярные или векторные), являющиеся характеристиками поля излучения. Характеристики поля определяют пространственно–временное распределение излучения в рассматриваемой среде.

1.2. Векторные и скалярные характеристики поля излучения

Имеются два вида полей – скалярные и векторные. Скалярное поле задается функцией положения $\phi(x, y, z)$, которая привязывает к каждой точке пространства определенное значение скаляра. Векторное поле задается векторной функцией $F(x, y, z)$, которая приписывает каждой точке в некоторой заданной системе отсчета вектор (Ω).

Скалярные характеристики поля излучения. Пусть параллельный пучок излучения направлен по перпендикуляру к поверхности поглощающей и рассеивающей среды. Обозначим буквой (F) число частиц, переносимых излучением через единицу площади за некоторый промежуток времени. Введенная для данных условий опыта величина F называется **флюенсом**; в этом случае она выражает отнесенное к единице площади число частиц направленного излучения, проходящих через перпендикулярно расположенную по отношению к направлению распространения излучения поверхность.

Рассмотрим теперь два пучка излучения, приходящих в некоторую точку (A) по двум различным направлениям от источников S_1 и S_2 (рис. 2).

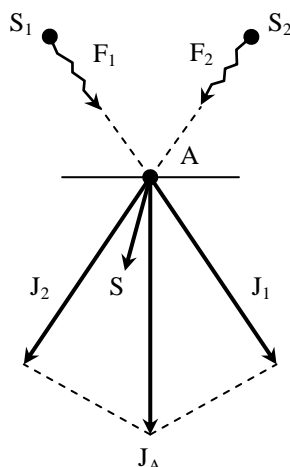


Рис. 2. Излучение двух источников в точке «А».

Результирующий флюенс F в точке A равен сумме флюенсов F_1 и F_2 излучений соответствующих источников. Флюенс равен числу частиц, прошедших за время наблюдения через площадку единичной площади, расположенной перпендикулярно к направлению S_1A . Чтобы найти флюенс F_2 , надо эту площадку повернуть около точки A так, чтобы она была перпендикулярна направлению S_2A и измерить прошедшее через нее число частиц за то же время. Результирующий флюенс равен:

$$F_A = F_1 + F_2$$

Такое правило получения результирующего флюенса в некоторой точке пространства применимо для любого числа пучков излучений, приходящих в эту точку по

различным направлениям. Таким образом, чтобы определить флюенс частиц от произвольным образом распределенных точечных источников, нужно знать число частиц, проходящих от каждого источника через единичную площадку, центр которой находится в интересующей нас точке пространства. При этом единичная площадка каждый раз должна быть расположена перпендикулярно к направлению распространения излучения от источника до данной точки.

Векторные характеристики поля излучения. Рассмотрим распространение излучения около точки A пространства, определяемой радиус – вектором \mathbf{r} , в пределах телесного угла $d\Omega$ в направлении единичного вектора $\mathbf{\Omega}$, который задан плоскими углами θ и φ (рисунок. 3).

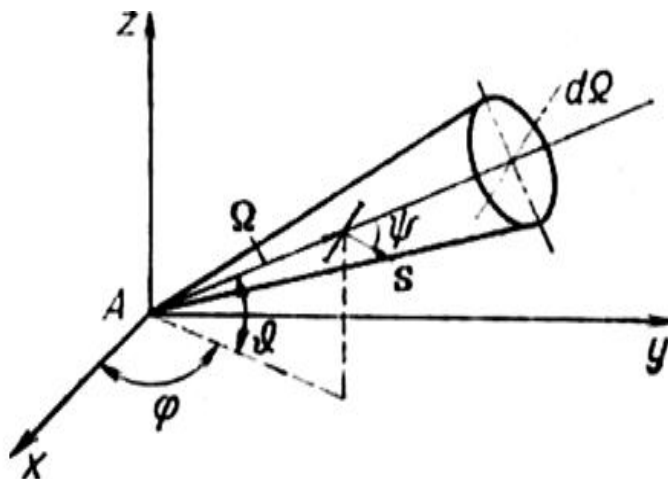


Рис.3. К определению дифференциальных характеристик поля излучения.

Пусть $F_1; (\tau, E, \theta, \varphi)$ есть число частиц излучения вида i , обладающих энергией в пределах от E до $E + dE$ и пересекающих единичную площадку, перпендикулярно расположенную к направлению единичного вектора $\mathbf{\Omega}$. Функция $F_1 (\tau, E, \theta, \varphi)$ выражает дифференциальное энергетическое и угловое распределение флюенса частиц около точки A пространства. Проинтегрировав эту функцию по углам, получим энергетическое распределение флюенса частиц:

$$F(r, E) = F_i(r, E, \varphi) d\Omega \cdot \varphi$$

Связь между характеристиками поля излучения и показаниями детектора. Исчерпывающая информация о поле частиц будет в том случае, если известно, как распределены частицы во времени, пространстве и по энергиям. Поле частиц характеризуют функцией $\Phi(r, E, \Omega, t) dE \cdot d\Omega \cdot dt$, которую называют дифференциальным (по энергии, времени и углам) потоком.

Дифференциальный поток – это число частиц с энергией E в интервале dE , движущихся в направлении $\mathbf{\Omega}$, в интервале телесного угла $d\Omega$ и пересекающих в точке r в момент времени t в интервале dt единичную площадку, нормаль к которой совпадает с направлением $\mathbf{\Omega}$.

Интегральный поток $\Phi(r, t) dt$ – это интеграл от дифференциального потока по всем энергиям и направлениям движения частиц.

Таким образом, интегральный поток – это число частиц в момент времени t в интервале dt , пересекающих по всем направлениям сферу с единичной площадью центрального сечения и с центром в точке r .

Введем еще понятие дифференциального тока $J(r, E, \Omega, t) dE \cdot d\Omega \cdot dt$.

Дифференциальный ток – это число частиц с энергией E в интервале dE , пересекающих в данный момент времени t в интервале dt , в направлении $\mathbf{\Omega}$, в интервале телесного угла $d\Omega$ единичную площадку, нормаль к которой задана вектором $\mathbf{\Omega} \mathbf{J}$.

Аналогично интегральному потоку определяется **интегральный ток**, который является векторной величиной и дает разность между числом частиц, прошедших за время dt в момент t через единичную площадку, перпендикулярную вектору ΩJ со стороны полупространства, куда направлен вектор ΩJ , и числом частиц, прошедших через ту же площадку, но со стороны другой половины пространства. Интегральный ток при изотропном дифференциальном потоке равен нулю.

1.3. Основные единицы измерения поля излучения

В ядерной физике и дозиметрии широко используется внесистемная единица измерения энергии – электрон-вольт (Эв). **Электрон-вольт**, это энергия, приобретаемая электроном при прохождении электрического поля с разностью потенциалов в 1 В:

$$1 \text{ эВ} = 10^{-3} \text{ кэВ} = 10^{-6} \text{ МэВ}.$$

Единицей энергии ионизирующего излучения в системе СИ является джоуль (Дж) и его десятичные и кратные единицы:

$$1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}; 1 \text{ Дж} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ эВ}.$$

Для характеристики поля излучения в практических задачах часто используется **поток ионизирующих частиц** или **флюенс ионизирующих частиц** (то есть **перенос**) – это отношение числа ионизирующих частиц dN , проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения dS этой сферы:

$$\phi = \frac{dN}{dS}.$$

Как общепринято в физике, под dN понимают как дифференциал ожидаемого значения числа частиц N . При этом дифференциал в знаменателе, с одной стороны, мал по сравнению с изменением поля излучения, с другой стороны, достаточно велик, чтобы можно было зарегистрировать много частиц. При практических измерениях под элементарной следует понимать такую сферу, в пределах объема которой характеристики поля излучения можно считать неизменными.

Единица флюенса частиц в СИ: м^{-2} , предпочтительная см^{-2} , т.е. част./м^2 , част./см^2 .

Плотностью потока частиц называют отношение потока частиц $d\Phi$ за некоторый промежуток времени dt к этому промежутку времени:

$$J = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dN}{dS \cdot dt}, \left(\frac{\text{част.}}{\text{м}^2 \text{с}}, \frac{\text{част.}}{\text{см}^2 \text{с}} \right).$$

Мощность источника (W) – отношение энергии dE частиц (или квантов), излучаемых источником, к единице времени dt :

$$W = dE/dt, (\text{Дж/с}):$$

Потоком энергии излучения называется отношение энергии dE частиц или квантов ионизирующего излучения, проникающих в объем элементарной сферы с площадью поперечного сечения dS , к этой площади:

$$F = \frac{dE}{dS}, \left(\frac{\text{МэВ}}{\text{м}^2}, \frac{\text{эрг}}{\text{м}^2}, \frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2}, \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2} \right).$$

Интенсивностью излучения (плотностью потока энергии) называется отношение потока энергии излучения dF частиц или квантов ионизирующего излучения за некоторый промежуток времени dt к этому промежутку времени:

$$I = \frac{dF}{dt} = \frac{dE}{dS \cdot dt}, \left(\frac{\text{МэВ}}{\text{м}^2 \text{с}}, \frac{\text{эрг}}{\text{м}^2 \text{с}}, \frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \text{с}}, \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{с}} \right).$$

Интеграл интенсивности излучения по времени назван **количеством излучения** (Копенгаген, 1953 год). Эта физическая величина получила название

«доза».

Введенные в этом параграфе характеристики поля излучения – флюенс частиц, плотность потока частиц и интенсивность излучения – положительные скалярные величины. Как эти величины даны здесь, они являются интегральными характеристиками поля и не дают представления об энергетическом и угловом распределении излучения. Более детально поле излучения можно описать дифференциальными характеристиками.

РАЗДЕЛ 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1. Типы радионуклидных источников

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

Радионуклидные источники ионизирующего излучения могут быть двух видов – **открытые и закрытые**.

Закрытые радионуклидные источники заключены в оболочку из нетоксичного материала (платина, золото, нержавеющая сталь, стекло, пластмасса и т.п.), препятствующую непосредственному контакту радиоактивного вещества с окружающей средой.

Открытые радионуклидные источники – это источники ионизирующего излучения в которых радионуклиды находятся в различных агрегатных состояниях (коллоидальные растворы, газы, суспензии и т.п.), вступающие при их использовании в непосредственный контакт с окружающей средой.

Источники ионизирующего излучения классифицируются по геометрическим размерам (форма, размеры) и по спектрально–угловому распределению испускаемого излучения.

Точечный источник излучения (S) – это источник ионизирующего излучения размеры которого «a» малы по сравнению с расстоянием от источника излучения «R» на котором нас интересует интенсивность излучения «I_R», т.е. (a « I_R), рис. 4.

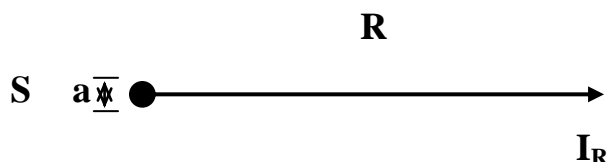


Рис.4. Точечный источник излучения.

Точечный мононаправленный источник с энергией гамма-квантов «E», (тонкий луч): источник помещен в точке с координатой **r**₀; излучение коллимировано в направлении **Ω**₀, где S–мощность источника; S(r,E,Ω), рис. 5.

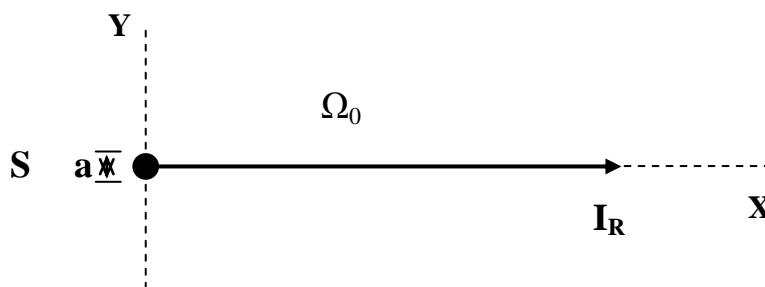


Рис. 5. Точечный мононаправленный источник.

Точечный изотропный мононаправленный источник, это источник, который помещен в точке с координатой \mathbf{r}_0 , излучение в единицу телесного угла π источника нормировано на одну частицу или квант в секунду в телесный угол 4π стерадиан, рис. 6.

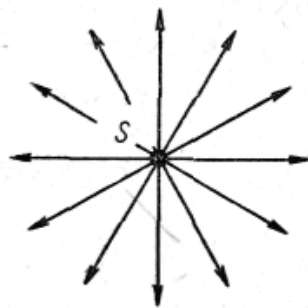


Рис. 6. Точечный изотропный мононаправленный источник.

Точечный косинусоидальный моноэнергетический источник – это источник, который помещен в точке координатой \mathbf{r}_0 , излучение в единицу телесного угла изменяется в зависимости от угла по закону $\text{Cos}\theta$: для углов $-\frac{\hbar}{2} \leq \theta \leq +\frac{\hbar}{2}$ излучение есть, а излучения в углах $+\frac{\hbar}{2} \leq \theta \leq -\frac{\hbar}{2}$ нет, $\mathbf{S}(\mathbf{r}, \mathbf{E}, \theta)$, $1/\text{с}\cdot\text{стер}$, рис. 7.

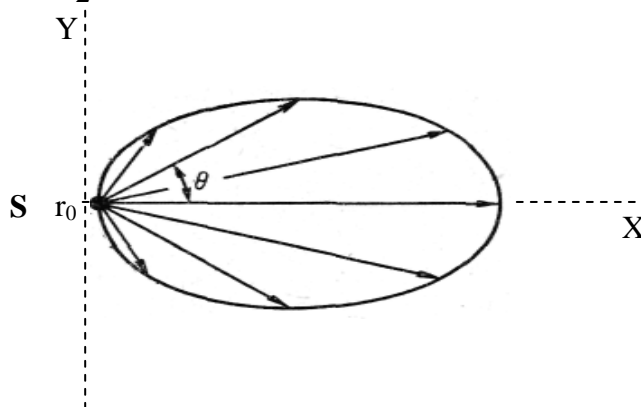


Рис. 7. Точечный косинусоидальный моноэнергетический источник.

Плоский мононаправленный моноэнергетический источник, это суперпозиция по плоскости точечных источников. Как правило излучение параллельно нормали к плоскости. Размеры и форма плоскости могут быть любые, рис. 8.

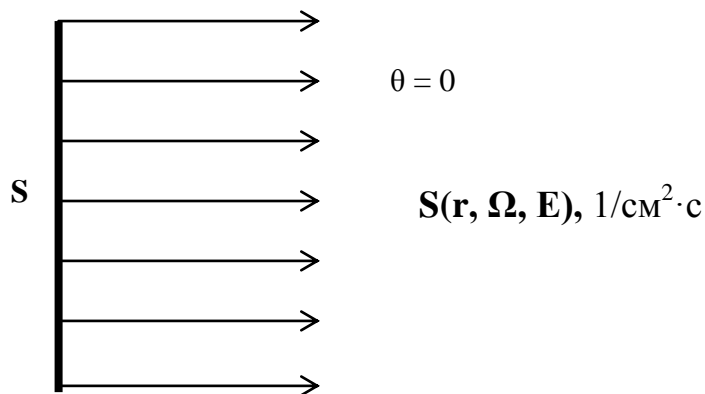


Рис. 8. Плоский мононаправленный моноэнергетический источник.

Плоский изотропный моноэнергетический источник, это суперпозиция по плоскости точечных моноэнергетических источников, $\mathbf{S}(\mathbf{r}, \mathbf{E})$, $1/\text{см}^2\cdot\text{с}\cdot\text{стер}$, (рис. 9).

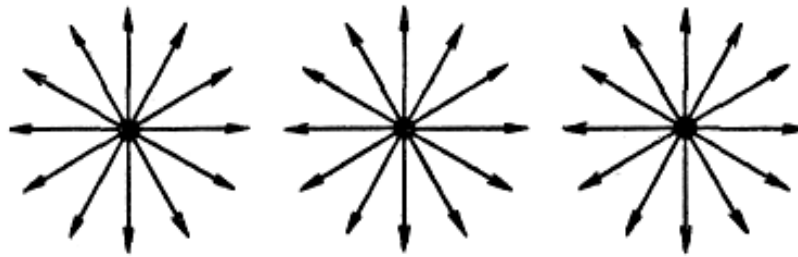


Рис. 9. Плоский изотропный моноэнергетический источник.

Плоский косинусоидальный моноэнергетический источник, это суперпозиция по плоскости бесконечных размеров точечных косинусоидальных источников, рис.10.

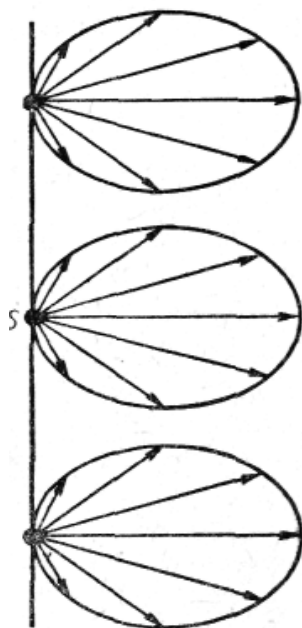


Рис. 10. Плоский косинусоидальный моноэнергетический источник.

Введение понятия плоских косинусоидальных моноэнергетических источников упрощает решение некоторых задач защиты. Строго говоря, плоский косинусоидальный моноэнергетический источник формируется на границе полубесконечного объемного источника с самопоглощением без учета рассеянного излучения с равномерно распределенным по объему изотропными источниками.

2.2. Геометрия узкого и широкого пучка гамма-излучения

При прохождении излучения через вещество фотоны в процессе взаимодействия могут испытывать отклонения от своего первоначального направления движения, т.е. рассеиваться.

Если условия эксперимента таковы, что детектор излучения, расположен за поглотителем, не регистрирует рассеянных фотонов, то такой пучок называют **узким** (т.е. соблюдается «хорошая геометрия»), рис. 11.

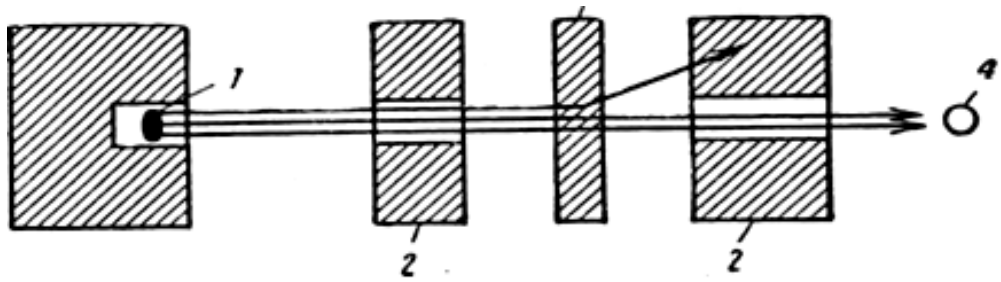


Рис. 11. Геометрия узкого пучка.

1 – источник излучения; 2 – диафрагмы, 3 – поглотитель, 4 – детектор.

Если рассеянные фотоны попадают в детектор, то такой пучок излучения является широким, «плохая геометрия» (рис. 12).

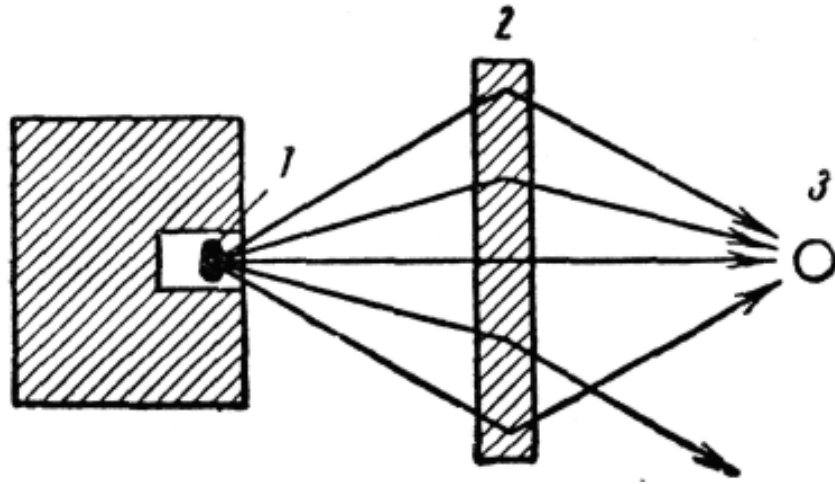


Рис. 12 . Геометрия широкого пучка γ -излучения.

1 – источник излучения, 2 – поглотитель; 3 – детектор.

В практических условиях (как правило) приходится иметь дело с широкими пучками излучения. Узкие пучки обычно создаются в специальных экспериментальных установках.

Поле излучения за защитой. Наиболее характерные поля излучения точечных и протяженных источников за защитой приведены на рис. 13 и 14, если не сделано специальных оговорок, предполагается изотропный характер излучения и отсутствие самопоглощения в материале источника.

Плотности потока от точечного источника (рис.13) мощностью S (частица/сек) в точке P_1 и в точке P_2 после защиты толщиной μd и без защиты ($\mu = 0$) равны соответственно:

$$\Phi_1 = \frac{S}{4\pi b^2} e^{-\mu d}; \quad \Phi_2 = \frac{S}{4\pi(b \cdot \sec \theta)^2} e^{-\mu d \cdot \sec \theta};$$

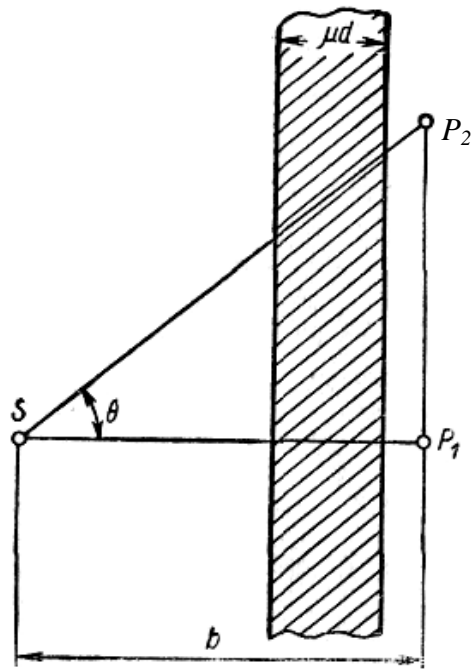


Рис. 13 . Излучение точечного источника за защитой.

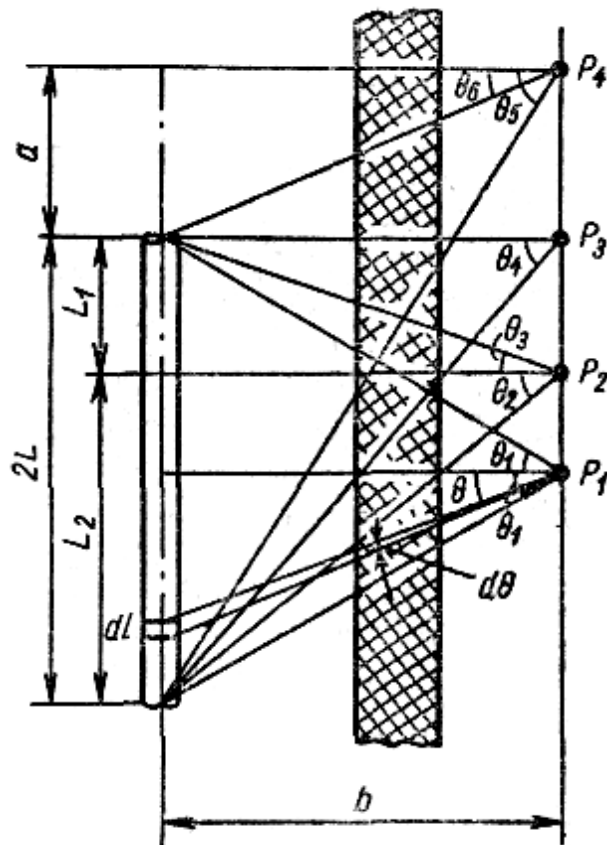


Рис. 14. Излучение линейного непоглощающего источника в боковом направлении.