

Лабораторная работа № 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ И ГАЗОВ В ВОЗДУХЕ

Дозиметрия радиоактивных аэрозолей и газов

Постоянное развитие ядерной промышленности неразрывно связано с увеличением накопления радиоактивных изотопов. Причем опасность может возникнуть в случае непредвиденной утечки из хранилища радиоактивных отходов, а также при аварийных ситуациях на ядерных реакторах или на заводах по регенерации ядерного топлива.

Помимо потенциальной опасности вследствие радиационных аварий ядерная промышленность является постоянным источником загрязнения атмосферы газообразными радиоактивными веществами.

Если выбросы короткоживущих изотопов создают проблемы защиты персонала и населения, проживающего вблизи предприятий, то выбросы долгоживущих изотопов приводят к глобальному загрязнению атмосферы. Особое место среди таких радионуклидов занимают газообразные, например Kt-85, C-14, H-3, I-131, Xe-133, Ag-41, Rn-222.

Для выбора оптимальных критериев степени радиационной опасности радиоактивных газов и аэрозолей необходимо знать факторы, влияющие на формирование тканевой дозы в теле человека.

Сведения о тканевых дозах при внутреннем облучении могут быть получены, если известны закономерности накопления, распределения и выделения радиоактивных газов и аэрозолей из организма человека. Немаловажная роль отводится здесь дозиметрии радиоактивных газов и аэрозолей, основной целью которой является своевременное предупреждение персонала или населения.

Инкорпорированными называются такие радионуклиды, которые попали внутрь живого организма. Различают три основных пути поступления радионуклидов в организм: через органы дыхания (ингаляционный путь), через органы пищеварения (пероральный путь) и через кожу. Органы дыхания, пищеварения и кожа в данном случае выступают не только в качестве "ворот" и "путепровода" для радионуклидов.

В течение некоторого времени они содержат в себе поступившие радионуклиды, и в данном случае их можно назвать входным «депо», так как часть радионуклидов попадает в кровь и с кровотоком разносится по внутренним органам и тканям, непосредственно связанным с внешней средой. В результате эта часть радионуклидов переходит из крови во внутренние органы и ткани человека и животных. Их дальнейшая судьба определяется как свойствами самих радионуклидов, так и процессами, протекающими в живых организмах. В конечном итоге инкорпорированные радионуклиды частично распадаются и частично выводятся из организма в результате биологических обменных процессов.

Будучи инкорпорированными в течение некоторого времени в органах и тканях, радионуклиды создают внутреннее облучение живых организмов. Поглощенная доза при внутреннем облучении может быть сопоставима с биологическими последствиями, и в этом случае она выступает в качестве меры радиационной опасности тех радиоактивных веществ, которые, находясь во внешней среде, могут попасть внутрь организма.

Источниками инкорпорированных радионуклидов служат любые радиоактивные вещества естественного и искусственного происхождения, которые находятся во внешней среде в жидкой, газообразной и пылеобразной формах и с которыми возможен контакт человека или животных. В каждом из перечисленных первичных "депо" механизм попадания радионуклидов в кровь имеет свои особенности. Важными факторами при этом являются химическая форма радионуклида, его растворимость в жидкой среде входного "депо" и время нахождения в нем, а также состояние живого организма; в частности избыток или недостаток жизненно важного элемента, аналогом которого может являться рассматриваемый радионуклид, а также функциональное назначение данного "депо".

Радиоактивные аэрозоли

Из трех путей поступления ингаляционный – наиболее важный и опасный путь, а наиболее сложной формой радиоактивных веществ, попадающих в организм через дыхательную систему, являются радиоактивные аэрозоли.

Аэрозоли – это газовая среда вместе со взвешенными мельчайшими частицами, т.е. любые взвешенные частицы в воздухе.

В зависимости от агрегатного состояния различают аэрозоли с твердой дисперсной фазой (пыль различных веществ, дым) и аэрозоли с жидкой дисперсной фазой (туманы или аэрозоли конденсации).

Естественными носителями радиоактивности атмосферного воздуха являются эманации (радон, торон, актинон) и их дочерние продукты – радиоактивные изотопы полония, висмута, свинца, талия, которые могут осесть на взвешенных в воздухе частицах, тогда как твердые продукты распада эманации в результате объемной конденсации сами могут образовывать аэрозоли различной дисперсности. Концентрация радона в воздухе составляет около $11,1 \cdot 10^{-3}$ Бк/л; торона – около $26,9 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, а концентрация их продуктов распада составляет в среднем $10^{-3} - 10^{-2}$ Бк/л.

Для аэрозолей свойственны свои способы образования, основными из которых являются следующие:

1) некоторые радиоактивные элементы в процессе распада образуют радиоактивные газы или эманации (радон, торон, актинон), которые поступают в окружающую среду. Продукты распада таких газов в результате радиоактивного распада и объемной конденсации могут образовывать твердые частички разной величины, которые оседают на взвешенные в воздухе частички пыли и т.д.;

2) многие радиоактивные элементы, распадаясь, образуют ряд радиоактивных продуктов распада. В этом случае в процессе распада в воздух попадают радиоактивные атомы, которые могут быть захвачены взвешенными частицами, находящимися в воздухе. Хотя подобные атомы отлетают от материнского вещества в воздухе на расстояние порядка 0,1 мм, но в результате диффузии и конвекции они могут быть

унесены далеко от места своего образования;

3) радиоактивные аэрозоли могут образовываться также в случае, если продукты распада основного радиоактивного элемента нерадиоактивны. Причиной этого является то, что нерадиоактивные атомы продуктов распада, улетая от материнского вещества, могут увлечь за собой частицы радиоактивных элементов, которые оседают затем на взвешенных в воздухе пылинках.

Источниками радиоактивных аэрозолей служат ядерные реакторы и ускорители частиц, а также их преобразование при авариях и активации нейтронами неактивной пыли. При нормальной работе реактора происходит активация тепловыми нейтронами аргона, который входит в состав охлаждающего воздуха или газа, заполняющего кладку реактора. При нарушении целостности защитной оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) продукты деления ядерной реакции могут попасть в теплоноситель первого контура. В этом случае появится реальная угроза загрязнения воздуха радиоактивными газами – криптоном, ксеноном, йодом и радиоактивными продуктами деления урана – $\text{Ce-144} + \text{Pr-144}$, $\text{Sr-90} + \text{Y-90}$, Y-91 , Sr-89 , $\text{Ba-140} + \text{La-140}$, $\text{Sr-95} + \text{Nb-95}$, Pm-147 и др. Также радиоактивные аэрозоли образуются в процессе производства и обработки радиоактивных материалов (дробление, механическая обработка, выпаривание, кипячение и т.д.), при взаимодействии космических лучей с атмосферной пылью.

Количество аэрозолей можно характеризовать их концентрацией, понимая под ним число частиц или их массу в единице объема атмосферного воздуха. Поэтому различают счетную и массовую концентрации.

Радиоактивные аэрозоли характеризуются активной концентрацией. Под активной концентрацией понимается скорость распада радионуклидов в единице объема или активность единицы объема атмосферного воздуха.

Переход от активной концентрации аэрозоли к массовой концентрации, предполагая то, что аэрозольные частицы состоят только из радиоактивных частиц с относительной атомной массой A и периодом полураспада T , может быть осуществлен по формуле

$$M = 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot A \cdot T_{1/2} \cdot A_0, \text{ г/л,}$$

где A_0 – активная концентрация, Ки/л,

$T_{1/2}$ – сут.

Зная средний размер аэрозольных частиц D и массовую концентрацию M , легко найти число частичек в единице объема.

Свойства аэрозолей зависят от размера частиц. По дисперсности аэрозоли делятся на три группы:

крупнодисперсные (неустойчивые) – частицы диаметром 10^{-4} см и более; хорошо видны в обычный микроскоп, очень быстро оседают и поэтому находятся в воздухе непродолжительное время;

среднедисперсные (относительно устойчивые) – частицы диаметром от 10^{-5} до 10^{-4} см; частицы медленно оседают в неподвижном воздухе, поэтому могут находиться во взвешенном состоянии различное время в зависимости от размера частиц и их концентрации;

мелкодисперсные или **высокодисперсные** (устойчивые) – частицы диаметром менее 10^{-5} см; эти частицы движутся подобно молекулам воздуха, т.е. подчиняются закону броуновского движения.

Необходимо отметить, что около 90% радиоактивных аэрозолей, находящихся в атмосфере, состоят из мелкодисперсных частиц диаметром менее $0,5 \cdot 10^{-5}$ см, причем большая доля приходится на частицы размером от $1 \cdot 10^{-7}$ см до $4 \cdot 10^{-6}$ см при очень малой концентрации (менее 100 част/см³). Устойчивость аэрозолей определяется многими факторами и, прежде всего, размерами аэрозольных частиц. Естественное разрушение аэрозолей происходит в результате трех основных процессов: седиментации, диффузии и коагуляции. Для жидких аэрозолей существенную роль играет испарение.

Седиментация – это оседание аэрозольных частиц под действием силы тяжести. Например, если диаметр частиц равен 10^{-6} см, то скорость седиментации составит $V = 6,6 \cdot 10^{-6}$ см/с; для $d = 10^{-1}$ см – $V = 410$ см/с. Таким образом, процесс седиментации играет существенную роль для частиц более 10^{-4} см.

Для частиц с $r < 10^{-4}$ см существенную роль играет диффузия, а для частиц с $r < 10^{-5}$ см она является преобладающей.

Диффузия – это процесс выравнивания плотностей (или концентраций) двух веществ при их смешивании друг с другом, т.е. взаимное проникновение веществ друг в друга.

Среднее смещение частиц за время t в результате диффузии определяется по формуле

$$\chi = \sqrt{2 \cdot Dt},$$

где D – коэффициент диффузии.

При неравномерной концентрации частицы будут перемещаться из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией.

В результате диффузии аэрозольные частицы оседают на окружающих предметах и объектах, а также сталкиваются друг с другом.

Взаимное столкновение частиц приводит к их коагуляции – слипанию частиц малого диаметра в результате их столкновения и образованию более крупной частицы. Образующаяся более крупная частица в дальнейшем также будет увеличивать свой размер в результате прилипания к ней новых мелких частичек до тех пор, пока не увеличится настолько, что осядет под действием силы тяжести. Установлено, что коагуляция мелкодисперсных аэрозолей происходит тем быстрее, чем меньше размер частиц и чем выше их концентрация.

Радиоактивные газы

В атмосферном воздухе радиоактивные изотопы при обычных условиях присутствуют в виде газа, пара

или входят в состав газообразных соединений. Их называют радиоактивными газами. Основными дозобразующими являются H_3 , C-14 , Ar-41 , Kr-85 , I-131 , R_n -222.

Тритий (H-3). В атмосферном воздухе может находиться в виде свободного газа или окислов, представляющих собой пары тритиевой воды.

Основным источником выброса в атмосферу трития являются заводы по регенерации ядерного горючего и ядерные реакторы, а также аварийные утечки тяжелой воды из технологического оборудования первого контура. Концентрация трития в воздухе в помещениях первого контура реактора достигает $1,6 \cdot 10^{-5}$ Ки/л, максимальный выброс в атмосферу трития – 114 Ки/сут.

Немаловажная роль в выбросах трития в окружающую среду принадлежит заводам по получению трития для термоядерных зарядов. Возникновение трития в атмосферном воздухе под действием космического излучения имеет место на ядрах азота и кислорода в верхних слоях атмосферы, где он соединяется с кислородом воздуха, образуя сверхтяжелую воду. Общее содержание трития в биосфере земли составляет около 1,8 кг. В атмосферном воздухе постоянно содержится около 11 г трития (10^5 Ки), в организме человека – около 10^{-10} Ки.

Углерод (C-14). Радиоактивный углерод обычно находится в виде двуокиси углерода, так как имеет способность быстро окисляться. Он может образовываться в ядерных реакторах в результате следующих реакций: $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$; $^{17}\text{O} (n, \alpha) ^{14}\text{C}$ и $^{13}\text{C} (n, \gamma) ^{14}\text{C}$, так как исходные ядра азота, кислорода и углерода в больших количествах присутствуют в замедлителе, теплоносителе или в качестве примесей в конструкционных материалах. Например, на трубном варианте уран-графитового реактора графитовый замедлитель продувается постоянно азотом для уменьшения выгорания графита.

Важно знать исходные данные по скорости образования на ядерных реакторах радиоуглерода и мощности его выброса в атмосферу. Ежедневно на 1 МВт тепловой мощности выбрасывается 0,75 мКи радиоактивного углерода на уран-графитовых реакторах и 0,25 мКи на реакторах с водяным теплоносителем.

Радиоактивный углерод также образуется в атмосфере в основном на ядрах азота под действием вторичных космических частиц, содержащих в своем составе нейтроны. ^{14}C образуется в верхних слоях атмосферы, и, соединяясь с кислородом, превращается в двуокись углерода. Благодаря круговороту углерода в природе происходит постоянный обмен ^{14}C между атмосферой, гидросферой, почвенным покровом и органическим миром. Одна часть углерода находится в осадочных породах и отложениях, угле, нефти (она практически не участвует в обменном процессе) и содержит 99,83% всего углерода (4800 г/см^2) земной поверхности, которая равна $5,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$. Другая часть земного запаса углерода сосредоточена в уже упомянутом обменном бассейне (около 0,17%). Удельная активность естественного углерода составляет 14 ± 1 распад/мин одного грамма углерода в резервуарах обменного бассейна. В теле стандартного человека – около 80 нКи ^{14}C .

Аргон (Ar-41). Радиоактивный аргон-41 образуется при захвате нейтрона ядром Ar. Содержание его в воздухе равно 0,93 объемных процентов. Мощность выброса в атмосферу зависит от конструктивных особенностей ядерных реакторов. Наибольший выброс в атмосферу (до 16000 Ки/сут) наблюдается на графитовых реакторах с воздушным охлаждением.

Выброс аргона в атмосферу создает проблему обеспечения радиационной защиты населения, проживающего вблизи ядерных реакторов.

Характерной особенностью ядерных реакторов является тот факт, что в подавляющем большинстве случаев радиоактивные изотопы осколочного происхождения присутствуют в вентиляционных газах, удаляемых в атмосферу. Концентрация их может колебаться в широких пределах, и она определяется в основном состоянием ТВЭЛ и типом реактора.

При подземных ядерных взрывах радиоактивные изотопы криптона, ксенона и йода в наибольших количествах по сравнению с другими продуктами деления выбрасываются в атмосферу. Интегральная мощность выброса радиоактивных газов может достигать до 1300 Ки/ч спустя 74 часа после взрыва.

Криптон (Kr-85). Радиоактивный криптон в общей массе атмосферы составляет $3,29 \cdot 10^4$ кг весовых и $1,14 \cdot 10^{-4}$ объемных процентов. В земной атмосфере содержится $1,63 \cdot 10^{13}$ кг криптона, в воде – около 2% его содержания в атмосфере. Это говорит о том, что он не удаляется из атмосферы. Следовательно, единственным фактором уменьшения радиоактивных газов в атмосфере является радиоактивный распад.

В атмосфере земли содержится около 10^7 Ки Kr-85 . При взрыве атомной бомбы мощностью в 1 кг тринитротолуола образуется $3,92 \cdot 10^{20}$ атомов Kr-85 (25,6 Ки). Основным источником загрязнения атмосферы криптоном являются радиохимические заводы по регенерации ядерного горючего.

В настоящее время концентрация Kr-85 в атмосферном воздухе составляет около $4,3 \cdot 10^{-12}$ Ки/л воздуха. При подземных ядерных взрывах радиоактивные изотопы криптона, ксенона и йода в наибольших количествах по сравнению с другими продуктами деления выбрасываются в атмосферу.

Йод (I-131). Химическое состояние йода в атмосферном воздухе зависит от условий его образования, среды, в которую он поступает, ее температуры и других факторов. Радиоактивный йод в воздухе присутствует в трех состояниях: в виде паров молекулярного йода; в виде аэрозолей; он входит в состав сложных соединений, которые по своей природе могут быть газообразными или твердыми веществами.

Особенности биологического действия радиоактивных аэрозолей и газов

Радиоактивные аэрозоли и газы представляют серьезную биологическую опасность, которая обусловлена попаданием их внутрь организма. Основной путь их поступления – органы дыхания, которые обладают хорошей адсорбирующей способностью по отношению к взвешенным частицам. В процессе дыхания аэрозольные частицы вместе с воздухом через трахею и бронхи могут попасть в альвеольные ткани, а оттуда – в лимфатическую систему или кровь.

Оседание аэрозолей на различных участках дыхательной системы зависит прежде всего от размера аэрозольных частиц. Механизм осаждения определяется движением по инерции, оседанием под действием силы тяжести, броуновским движением и пристеночным эффектом. Для здоровья человека наибольшую опасность представляют аэрозоли средней дисперсности диаметром от $1 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ см, так как не задерживаются верхними дыхательными путями как частицы диаметром более $5 \cdot 10^{-4}$ см, и не удаляются из легких вместе с выдыхаемым воздухом, как частицы менее $1 \cdot 10^{-5}$ см.

То что органы дыхания хорошо адсорбируют радиоактивные аэрозоли и газы, обусловлено большой площадью их поверхности: около $50-55 \text{ см}^2$, причем поверхность верхней части дыхательных путей составляет приблизительно 20 см^2 .

В силу защитных свойств организма часть аэрозольных частиц и газов, попавших в дыхательную систему, возвращается обратно в окружающую среду. Наиболее эффективно удаляются частицы размером более $2-10 \text{ см}$. Предполагается, что 75% вдыхаемых аэрозольных частиц задерживается в дыхательных путях, из них 50% удаляется мерцательным аппаратом и после попадания в полость рта заглатывается.

Радиационная опасность аэрозолей в конечном итоге определяется поглощенной дозой. Критическим органом в этом случае является дыхательная система, и, прежде всего, легкие. На поглощение влияет также скорость биологического выведения частиц из легких, вид и энергия ионизирующего излучения, распределение активности по частицам различного размера и характер их распределения. Это создает огромные трудности при непосредственном определении поглощенной дозы, поэтому практически все сводится к радиометрии аэрозолей.

Тканевые дозы в теле человека, создаваемые радиоактивными аэрозолями и газами

Для оценки степени радиационной опасности газов необходимо знать распределение тканевых доз в теле человека при внутреннем и внешнем облучении. Прогнозирование тканевых доз при внутреннем облучении может быть проведено только на основании данных о закономерностях накопления, распределения и выведения газов из организма человека.

В наибольших количествах инертные газы растворяются в веществах, состоящих из высокомолекулярных соединений, таких, как жир, эритроциты, кровь, и в меньших количествах – в мышцах и воде. Например, при производстве изотопов концентрация Хе-133 в теле работающих может достигать до $0,2 \text{ мкКи}$.

По рекомендации Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) принята единая схема задержки всех радиоактивных веществ в дыхательных путях "стандартного" человека. По этой схеме для всех изотопов независимо от размера, плотности, формы частиц и химического состояния принимается, что 75% поступающей активности задерживается в органах дыхания (из них 50% задерживается в дыхательных путях и затем заглатывается, а 25% осаждается в легких). В рекомендациях МКРЗ биологический период полувыведения I-131 из щитовидной железы принят равным 7,6 сут. Накопление йода в щитовидной железе здоровых людей может колебаться от 7 до 50% по отношению к поступившему количеству. Это обусловлено индивидуальными особенностями людей и наличием стабильного йода в рационе питания.

Радиоактивный йод является одним из "универсальных" изотопов с точки зрения радиационной опасности. Это связано с тем, что в производственных условиях он накапливается в щитовидной железе при аэрогенном поступлении, а в случае его выбросов в окружающую среду опасность радиоактивного йода в подавляющем числе случаев обусловлена пероральным поступлением с пищевыми продуктами, преимущественно с молоком. При попадании радиоактивного йода в атмосферный воздух происходит непрерывное оседание его на поверхность земли. Фиксируясь непосредственно в биомассе растений, он может поступать в организм человека при потреблении пищевых продуктов растительного происхождения. Другой, наиболее распространенный путь поступления радиоактивного йода в организм человека может быть представлен следующей цепочкой: воздух–растения–пастбищное животное–молоко–человек.

В природе углероду принадлежит особая биологическая роль. Он является структурной основой всех органических соединений. Углерод непосредственно входит в состав молекул белков и генетически значимых структур. Радиоактивный углерод проникает во все органы и ткани организма. Здесь проявляется его главная особенность: включаясь непосредственно в молекулы органических соединений, он является для них внутренним облучателем.

Наибольшая концентрация С-14 и соответственно дозовая нагрузка приходится на жировую ткань, которая является критическим органом для этого изотопа. Радиоактивный углерод может поступать в организм человека через органы дыхания в виде CO_2 и с пищевыми продуктами. Критическим органом при аэрогенном поступлении CO_2 являются легкие. Главным поставщиком С-14 в организм человека служат продукты питания растительного и животного происхождения. В организм человека ежедневно попадает с пищевым рационом примерно $1/30$ часть суммарной активности С-14, равной примерно $9 \cdot 10^{-8} \text{ Ки}$.

В процессе своей профессиональной работы человек может контактировать с элементарным тритием (свободным газом), окисью трития, а также с его различными соединениями. При попадании в организм человека тритий сравнительно равномерно распределяется в водной фазе в виде окиси, включается в молекулярные структуры. Скорость поступления окиси трития в виде паров через органы дыхания можно определить по формуле

$$F = V \cdot \eta \cdot Q,$$

где V – объем вдыхаемого воздуха за единицу времени, л/ч (для профессионалов – 1250 л/ч);

η – коэффициент задержки в органах дыхания (для окиси трития равен 100%);

Q – концентрация окиси трития в воздухе, Ки/л.

Элементарный тритий в виде свободного газа проникает в организм человека в количествах, примерно в

10^4 раз меньших, чем пары окиси трития. В рекомендациях МКРЗ биологический период полувыведения принят равным 12 суткам.

Мощность дозы при хроническом контакте можно рассчитать по формуле

$$D=51E_{\beta} \cdot q \cdot K, \text{ мбэр/сут},$$

где q – средняя концентрация трития в 1 г ткани, мКи/г;

K – коэффициент ОБЭ (1,7);

E_{β} – средняя энергия β -спектра.

Оценка дозовой нагрузки от внутреннего облучения

Поглощенную дозу при внутреннем облучении можно рассчитать, если известны радиоактивный изотоп, его распределение в организме и время облучения. Поглощенную дозу в любой момент времени после поступления в организм γ -излучающего изотопа вычисляют по формуле

$$D=0,032 \cdot K_{\gamma} \cdot C_0 \cdot \rho \cdot q \cdot T_{\text{эф}} \cdot (1 - e^{-0,693 \cdot t/T_{\text{эф}}}),$$

где K_{γ} – гамма-постоянная изотопа;

C_0 – начальная концентрация изотопа в ткани, мКи/г;

ρ – плотность ткани, г/см³;

q – геометрический фактор, в среднем $q=3T_1R$ с эффективным радиусом сферы $R = 10$ см;

$T_{\text{эф}}$ – эффективный период полувыведения изотопа из организма или органа, сут;

t – время облучения, сут.

Поглощенная доза для β -излучающих изотопов в любой момент времени определяется по формуле

$$D=73,8 \cdot C_0 \cdot E_{\beta} \cdot T_{\text{эф}} (1 - e^{-0,693 \cdot t/T_{\text{эф}}}), \text{ рад},$$

где E_{β} – средняя энергия β -частиц, МэВ.

Для α -частиц формула та же, но все умножают на 20.

При наличии в объекте скорости α -, β - и γ -излучающих изотопов отдельно рассчитывают дозы для каждого вида излучений, а полученные данные суммируют. Для расчета мощности поглощенной дозы в 1г ткани от β -излучающих изотопов можно воспользоваться формулой

$$D = 0,595 \cdot E_{\beta} \cdot A \cdot 10^{-5}, \text{ Гр/с},$$

где A – активность, мКи;

E_{β} – средняя энергия β -частиц.

При постоянной концентрации по высоте над поверхностью земли можно рассчитать мощность дозы от естественных радиоактивных изотопов R_n и T_n и их продуктов распада по следующим формулам:

$$P_{(R_n)} = 14,2 \cdot 10^{12} Q_{R_n}, \text{ мрад/год};$$

$$P_{(T_n)} = 14,2 \cdot 10^{12} Q_{T_n}, \text{ мрад/год},$$

где Q – концентрация в атмосферном воздухе, Ки/л.

Доза облучения легких рассчитывается следующим образом:

$$D = 5 \cdot 10^{14} C_{R_n}, \text{ мрад/год};$$

$$D = 66,5 \cdot 10^{14} C_{T_n}, \text{ мрад/год},$$

где C – концентрация радона в воздухе, Ки/л.

Устройство и принцип работы установки РГТ-01Т

Установка состоит из радиометра, пробоотборника и вспомогательных устройств. Радиометр включает в себя пульт управления и устройство детектирования. Пробоотборник состоит из воздуходувки и кассеты. Вспомогательное устройство включает в себя десорбер и зарядное устройство.

Описание работы радиометра. Световые вспышки, образующиеся в кристалле Na (Тl) в результате распада радона, усиливаются фотоэлектронным умножителем ФЭУ-82 и преобразуются в импульсы напряжения, которые предварительно усиливаются. Импульсы по кабелю подаются на пульт управления на дискриминатор, который пропускает импульсы амплитудой более 0,2 В в цепь управления. Цепь управления при нажатии кнопки «ПУСК» пропускает импульсы на счетную ячейку и одновременно запускает таймер. По истечении заданного времени нажимается кнопка «СТОП» и количество импульсов, пропорциональное активности радона, фиксируется на индикаторах счетчика.

В пульте управления имеются блоки низковольтного питания, обеспечивающие работу электрической схемы, а также блок высоковольтного питания для работы фотоэлектронного умножителя.

Расположение органов управления подключения и объема информации. На лицевой панели пульта управления расположено индикаторное табло для съема информации о количестве зарегистрированных импульсов и времени измерения. На задней стороне пульта управления – тумблер включения питания, клемма заземления, держатель предохранителя, выходные разъемы и сетевой кабель.

Перед включением пульта и воздуходувки в сеть их необходимо заземлить. При работе десорбера

необходимо соблюдать правила безопасности, так как кожух нагревается до температуры плюс 200°C.

Основные технические данные и характеристика установки РГТ-01Т приведены ниже.

1. Установка обеспечивает измерения объемной активности радона в диапазоне от 40 до $1,0 \cdot 10^7$ Бк/м³.
2. Уровень собственного фона – не более 15 с⁻¹.
3. Время измерения фона – не менее 10 мин.
4. Объем расхода воздуха, прокачиваемого через сорбционные колонки, – $0,2 \pm 0,5$ л/мин.
5. Предел допустимой относительной погрешности радиометра не превышает 5%.
6. В качестве осушителя прокачиваемого воздуха применяется прокаленный хлористый кальций.
7. Вместимость сорбционной колонки – 12 см³.
8. Коэффициент задержки радона – не менее 99,5%.
9. В качестве сорбента используется активный уголь СКТ-2 (ТУ6-16-2237–78).
10. Время отбора пробы – 2,5 мин.
11. Время установки рабочего режима радиометра – 30 мин.

Задание 1. Определение объемной активности радона в воздухе помещений с помощью радиометрической установки РГТ-01Т.

Цель задания: определить объемную активность радона в воздухе обследуемых помещений, сделать вывод о их радоноопасности и предложить способы снижения его содержания в воздухе.

Порядок выполнения задания. Процесс измерения объемной активности радона делится на три этапа:

- отбор пробы;
- измерение скорости счета пробы;
- расчет объемной активности радона в пробе.

Отбор пробы исследуемой воздушной среды производится в сорбционные колонки, заполненные сорбентом, концентрирующим радон. Прокачка воздуха через колонки осуществляется с помощью портативной мембранной воздуходувки через фильтр-осушитель в течение заданного времени.

Сорбционная колонка изготовлена в виде тонкостенного цилиндра диаметром 17 мм и длиной 67 мм из алюминиевого сплава. Торцы колонки закрыты латунной сеткой. Колонка обеспечивает адсорбцию радона из 10 дм³ исследуемого воздуха. Колонка вмещает 6 г активированного угля марки СКТ-2. Хранение колонок до и после отбора осуществляется в кассете, концентрация которой обеспечивает герметизацию колонок и практически исключает утечку радона из пробы. Сорбционную колонку вставляют в гнездо воздуходувки и производят отбор пробы в течение 2,5 мин по отградуированному ротаметру.

Измерение скорости счета пробы. От момента отбора пробы до начала измерения скорости счета должна быть выдержка не менее 2,5 часов. Перед измерением скорости счета необходимо провести определение собственного фона установки в течение не менее 10 мин. Нажмите кнопку «СТАРТ», затем «ПУСК» и через 10 мин кнопку «СТОП».

Скорость счета фона рассчитывают по следующей формуле

$$N_{\phi} = \frac{n_{\phi}}{60 \cdot t_{\phi}} \text{ (с}^{-1}\text{)},$$

где n_{ϕ} – количество фоновых импульсов за время измерения t_{ϕ} .

Определение эффективности регистрации. Образец помещают в цилиндрическое отверстие блока детектирования, закрывают свинцовой крышкой и нажимают кнопку «ПУСК». Время измерения определяется по графику (рис. 21). По истечении заданного времени нажимают кнопку «СТОП» и записывают показания счетчика импульсов и таймера.

Эффективность регистрации (в %) рассчитывают по следующей формуле:

$$\eta = \frac{N_0}{A_0 \cdot t_0} \cdot 100\%,$$

где N_0 – число импульсов за время t_0 ;

A_0 – активность образца, Бк (с⁻¹);

t_0 – время измерения, с.

Определение объемной активности пробы радона. Пробу помещают в детекторный блок и нажимают кнопку «ПУСК». Измерение проводят в течение времени, определенного по графику (рис. 21).

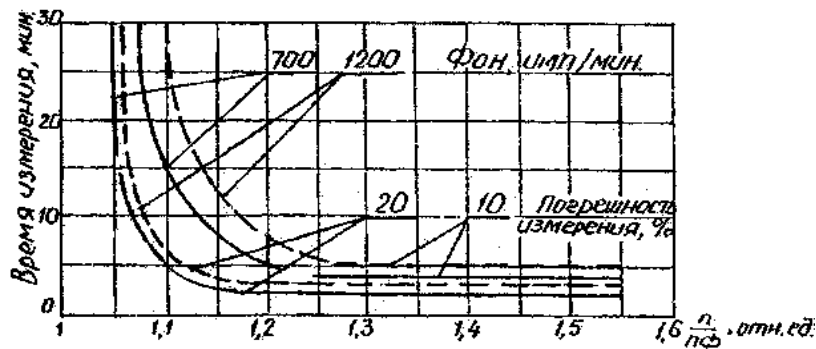


Рис. 21. График зависимости времени измерения импульсов от заданной погрешности и величины измеренной объемной активности радона.

По окончании измерения нажимают кнопку «СТОП» и записывают показания счетчика импульсов N . Объемную активность определяют по формуле

$$A = \frac{N - N_{\phi}}{\eta \cdot q} \cdot e^{\lambda_{Rn} \cdot \Delta t},$$

где N – скорость счета от пробы;

q – объем прокаченного воздуха, m^3 ;

Δt – промежуток времени от момента отбора до начала радиометрического измерения, мин;

λ_{Rn} – постоянная распада радона, $1,26 \cdot 10^{-4}$ мин.

Сравните расчеты содержания радона в воздухе помещений с допустимыми уровнями концентрации согласно НРБ–2000 и предложите мероприятия для его снижения.

Задача 2. Расчет доз облучения от инкорпорированных радионуклидов на различные органы и ткани человека.

Цель работы: произвести расчет поглощенной дозы от инкорпорированных радионуклидов.

Расчет тканевых доз производится по исходным данным (табл. 16) и формулам, приведенным выше.

Таблица 16. Исходные данные для расчета доз облучения

Радионуклид	$E_{\beta}(\max)$, МэВ	E_{α} , МэВ	E_{γ} , МэВ	$T_{\text{эф.сут}}$	t ,сут
Йод	0,806	–	0,364	7,6	8
Радон	–	5,49	–	–	10
Торон	–	6,28	–	–	2
Тритий	0,0186	–	–	12	10

Задача 1. Рассчитайте дозу облучения легких от радона, находящегося в табаке при выкуривании двух пачек сигарет в сутки, если активность одной сигареты составляет $1 \cdot 10^{-12}$ Ки.

Задача 2. Рассчитайте дозу облучения легких служащего офиса, находящегося в подвальном помещении здания, за 8 ч при концентрации радона в воздухе 100, 200, 300 и 400 Бк/ m^3 .

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой инкорпорированные радионуклиды?
2. Что является источником инкорпорированных радионуклидов?
3. Что такое радиоактивные аэрозоли?
4. Основные способы образования радиоактивных аэрозолей.
5. Источники радиоактивных аэрозолей.
6. Основные характеристики аэрозолей.
7. Особенности биологического действия радиоактивных аэрозолей и газов.
8. Что такое радиоактивные газы?
9. Назовите основные дозообразующие радиоактивные газы.
10. Поясните устройство и принцип работы радиометрической установки РГТ-01Т.
11. На какие группы по дисперсности делятся радиоактивные аэрозоли?