Радиационная безопасность

Один из видов техногенных ЧС — взрыв на атомной электростанции (АЭС) или другом объекте с выбросом радиоактивных веществ (РВ), в общем случае подобный взрыву ядерного оружия. Мощность ядерного взрыва характеризуется тротиловым эквивалентом — количеством взрывчатого вещества тротила, при взрыве которого выделяется столько же энергии, сколько и при данном ядерном взрыве. Поражающими факторами ядерного взрыва или взрыва с выбросом РВ могут быть: ударная волна, световое (или тепловое) излучение, проникающая радиация (или первичное ядерное излучение), радиоактивное заражение атмосферы и местности (или вторичное ядерное излучение) и электромагнитный импульс.

Ударная волна — это сферический слой резко сжатой среды, распространяющийся от места взрыва; несет ~50% энергии ядерного взрыва, 8 — 10% — нейтронного. Воздушная ударная волна — это высокое давление газообразных продуктов ядерного взрыва; в центре ядерного взрыва 20 кт оно достигает 10^{11}кПа, на расстоянии 0,7 км — около 100 кПа, на расстоянии 3 км — около 10кПа. Передняя граница сжатого воздуха с резким увеличением давления называется *фронтом ударной волны*. Вблизи от центра взрыва скорость ударной волны в несколько раз превышает скорость звука в воздухе, равную 331 м/с. Длительность фазы сжатия, т. е. действия избыточного давления — несколько секунд. За сжатием следует фаза разрежения, когда давление ниже атмосферного. Взрыв называется воздушным, если происходит на высоте до 10 км; наземным — на поверхности земли; подземным — ниже поверхности земли.

От воздушной ударной волны из-за высокого избыточного давления люди, находящиеся на открытой местности, могут получить поражения от легких до смертельных. Здания могут получить разрушения от легких (повреждаются второстепенные элементы, например кровля, остекление) до полных (при которых разрушаются все несущие конструкции).

Световое или тепловое излучение несет 30 — 40% энергии ядерного взрыва; это поток лучистой энергии, включающий в себя: 1) видимые лучи; 2) ультрафиолетовые лучи — невидимое электромагнитное излучение; в спектре — выше фиолетового; обладает сильным химическим и биологическим действием; 3) инфракрасные лучи — невидимое электромагнитное излучение; в спектре — под красным участком.

Источник светового излучения – светлая область взрыва из нагретых — до 8000 — 10000^0С веществ ядерного боеприпаса или того, что взорвалось, а также воздуха и грунта (при наземном взрыве). Продолжительность излучения (до десятков секунд) зависит от мощности взрыва. Поражающее действие – световой импульс (Дж/$м^2$) зависит от мощности и вида взрыва, ослабления излучения в атмосфере и обратно пропорционален квадрату расстояния от места взрыва. Радиус действия светового излучения больше, чем для ударной волны.

Световое излучение поражает глаза, воспламеняет одежду, обжигает открытые участки тела от покраснения кожи до обугливания. В зависимости от свойств материалов они оплавляются, обугливаются или воспламеняются, что ведет к пожарам.

Проникающая радиация или первичное ядерное излучение — это поток g-лучей и нейтронов в воздухе из разрушенной ядерной установки или факела выброса над ней; несет ~5% энергии ядерного взрыва или 85% — нейтронного. Источник радиации — ядерная реакция с самопроизвольным превращением ядер атомов одних элементов в другие.

g-лучи — это электромагнитное излучение в виде сгустков энергии — квантов, по длине волны и частоте колебаний близкое к рентгеновским лучам, лежащим в спектре выше ультрафиолетовых. Нейтроны — это ядерные частицы, не имеющие заряда. Нейтроны и g-лучи обладают высокой проникающей способностью и опасны даже при внешнем облучении (g-лучи проходят в воздухе несколько сот метров).

Радиоактивное заражение атмосферы и местности или вторичное ядерное излучение (~15% энергии ядерного взрыва) возникает при выпадении РВ из облака, образовавшегося над ядерным взрывом или разрушенным ядерным реактором. Распадаясь в воздухе, осев на землю, РВ испускают a и b-частицы и g-лучи. a — частицы — это поток ядер гелия, возникающих при ядерных превращениях; проникающая способность — несколько сантиметров в воздухе, но высокая ионизирующая способность, поэтому они наиболее опасны при внутреннем облучении, попадая в организм с воздухом, пищей и водой. b-частицы — это поток электронов; проникающая способность в воздухе — несколько метров; от облучения b-частицами эффективно защищает обычная одежда; на открытых участках тела могут быть радиационные ожоги.

a и b-частицы, g-лучи, нейтроны ионизируют среду, т. е. разбивают атомы и молекулы веществ на разнополярные ионы, поэтому их называют ионизирующим излучением (ИИ). На человека оно воздействует тремя путями: 1) внешнее облучение от радиоактивного облака и РВ, осевших на землю, т. е. воздействие через кожу; 2) внутреннее облучение при вдыхании РВ, выпадающих из облака, и нуклидов, вторично попавших в воздух с загрязненной поверхности. Нуклид — это атом с различным числом протонов и нейтронов в ядре, способный к радиоактивному распаду; 3) внутреннее облучение от загрязненных пищи и воды, т. е. через желудочно-кишечный тракт.

Взаимодействие ИИ с живым организмом приводит к образованию ионов, разрыву молекулярных связей и образованию в нем новых, несвойственных ему химических соединений. Излучения различаются по степени ионизации среды и лучевого поражения при одинаковой поглощенной тканями энергии; если эту способность g — и рентгеновских лучей принять за 1, то для нейтронов будет 10, для a-частиц — 20. Эти величины названы коэффициентами качества (или взвешивающими коэффициентами) излучения Q.

Различают следующие виды радиационных доз:

1) *экспозиционная* — это способность g-лучей ионизировать воздух. В системе интернациональной (СИ) единица измерения кулон/кг (Кл/кг). В радиобиологии — внесистемная единица рентген (Р) — это количество g-излучения, которое при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст создает в 1 см³ сухого воздуха 2×10^9 пар ионов. 1Р = $2{,}58\times10^{-4}$ Кл/кг. По этой дозе судят о болезнетворности g-излучения. На свойстве g-лучей ионизировать воздух основаны конструкции дозиметров — измерителей мощности дозы;

2) *поглощенная* — это количество энергии всех видов излучения, поглощенной единицей массы тела. В СИ единица измерения грей (Гр). 1 Гр равен энергии в 1 джоуль (Дж) любого излучения, переданной массе вещества в 1 кг. 1 Гр = 1Дж/кг = 100 Р. Внесистемная единица – рад (радиационная адсорбированная, т. е. поглощенная доза); 1Гр=100 рад;

3) *эквивалентная* — это поглощенная доза D погл, умноженная на коэффициент качества (или взвешивающий коэффициент) Q данного ИИ:

$$H = D_{погл} \times Q$$

В СИ единица измерения зиверт (Зв). 1 Зв = 1 Дж/кг=100Р. Внесистемная единица — бэр (биологический эквивалент рентгена)

— это количество излучения, биологический эффект которого равен воздействию 1Р;

4) разные части тела по-разному чувствительны к излучению, поэтому используется коэффициент радиационного риска (или взвешивающий коэффициент) Кр.р для данного органа или ткани: щитовидной железы — 0,05; красного кровяного мозга и легких — 0,12; молочной железы — 0,15; гонадов — яичников (женских) и семенников (мужских) — 0, 25 и т. д. Умножив эквивалентные дозы на Кр.р и просуммировав по всему организму, получают *эффективную дозу* — это суммарный эффект облучения; измеряется в зивертах (Зв);

5) *предельно допустимая доза* (ПДД) — это наибольшая эквивалентная доза за год, при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызывающая в здоровье человека неблагоприятных изменений.

Степень опасности РВ на местности (т. е. степень ее загрязненности РВ) оценивается внесистемной единицей кюри (Ku) — это количество РВ, в котором за одну секунду происходит 37×10^9 ядерных распадов или беккерелей. С загрязненной РВ территории временно отселяют население, если радиоактивность по цезию-137 больше или равна 15 Ku/км², по стронцию-90 больше или равна 3 Ku/км². Заражение местности РВ характеризуют также *мощностью дозы* — количеством излучения в единицу времени (Р/ч). 1 Ku/м² »10 Р/ч. Мощность дозы на высоте 1 м от поверхности земли называется *уровнем радиации* (с течением времени снижается), а в 1 — 2 см от поверхности предметов, одежды, продовольствия, воды, кожных покровов людей и животных — *степенью заражения.*

При разрушении ядерных реакторов радиоактивные частицы мелкие, образуются также газообразные радиоактивные облака; обычные СИЗ органов дыхания не могут полностью задержать такие частицы. При ядерном взрыве (боевом) частицы более крупные, поэтому воздух хорошо фильтруется СИЗ и даже носоглоткой человека, а с поверхности одежды и техники пыль легко удаляется. Поэтому при авариях на АЭС опасны внутреннее и внешнее облучение, а при ядерном взрыве — в основном, внешнее.

В процессе исторического развития человек постоянно подвергался воздействию природных источников ИИ: космической радиации, наземных естественных источников, пищи и выделяющегося всюду из земли невидимого, без запаха, тяжелого газа радона — наиболее весомого источника ИИ (~37% суммарного излучения природных и искусственных источников). А в целом природные источники излучения дают ~ 0,2 бэр/год, искусственные ~0,2 бэр/год: медицинские приборы, полеты в самолете, телевизор, испытания ядерного оружия, РВ на производстве (атомная энергетика, радиоизотопные контрольно-измерительные приборы).

«Нормами радиационной безопасности» (НРБ-96) предусмотрены принципы радиационной безопасности: 1) нормирования — непревышение дозового предела; 2) обоснования — исключение необоснованного облучения, если польза не превышает риск возможного вреда; 3) оптимизации — снижение облучения до возможно низкого уровня.

По возможности облучения всего тела население делится на категории:

А — персонал, работающий с источниками ИИ; ПДД = 5 бэр/ год.

Б — это персонал и население, которые не работают с ИИ, но при проживании или работе могут подвергаться их воздействию; установлен *предел дозы* (ПД) — предельная эквивалентная доза за жизнь; он определяется по усредненной дозе внешнего облучения, уровням радиоактивных выбросов и загрязнения среды. (ПД = 0,5 бэр/год);

В — остальное население; дозовые пределы устанавливаются Минздравом РФ по обстановке; на территории, загрязненной РВ, ПД = 35 бэр за жизнь; он не включает дозу от медицинских исследований и увеличения естественного фона.

В особых случаях (спасение людей, предотвращение аварий и переоблучения многочисленного контингента) с письменного разрешения администрации и согласия исполнителя допускается *планируемое повышение ПДД* в 2 раза в каждом случае или в 5 раз на протяжении всей работы. Норма 25 бэр была для ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) Планируемое повышение ПДД не разрешается, если работник ранее получил дозу выше годовой в 5 раз.

НРБ-96 вводят основные дозовые пределы.

Основные дозовые пределы облучения

Нормируемые величины	Дозовые пределы, мЗв	
	для персонала группы А*	для населения
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные пять лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в: хрусталике коже**, кистях и стопах	150 500	15 50

Примечания: * *Для персонала категории Б — не более ¼ значений для категории А.*

** *В слое толщиной 5 мг/см², на ладонях 40 мг/см².*

При передозировке воздействия ИИ возникает лучевая болезнь — детерминированные, нестохастические пороговые эффекты (стохастические – случайные, вероятностные): 1) острая лучевая болезнь (ОЛБ) — при однократных больших дозах облучения в короткие сроки (поглощенная доза выше 0,25 Гр); 2) хроническая — при многократных небольших дозах, но выше ПДД.

При малых дозах могут развиться стохастические беспороговые эффекты: опухоли; лейкозы (лейкемия, белокровие) — заболевания кроветворной системы; генетические дефекты.

Этапы развития ОЛБ: 1)поглощение излучения тканями; 2) физико-химические процессы в тканях: ионизация среды и радиолиз воды (распад под действием ИИ). Образовавшиеся ионы и оторванные от атомов электроны образуют перекисные соединения — перекись водорода и более сильные окислители; 3) биологический эффект: перекисные соединения губят часть клеток; изменяются биохимические, иммунные и другие реакции, что дает полиморфизм клинической картины, а в тяжелых случаях – смерть (морфизм— форма, вид; поли… — много…). Этапы 1-й, 2-й и часть 3-го скоротечны — наносекунды (нано — 10^{-9}).

Клинические формы и тяжесть ОЛБ: 1) при поглощенной дозе 1 — 10 Гр клиническая форма костномозговая, основное — поражение кроветворной ткани; при дозе 1 — 2 Гр степень тяжести I (легкая), прогноз абсолютно благоприятный; при дозе 6 — 10 Гр степень тяжести IV (крайне тяжелая), прогноз неблагоприятный; 2) при дозах 10 — 20 Гр клиническая форма кишечная — также поражается кишечный эпителий (ткань, покрывающая кожу, роговицу глаз, все полости организма), вызывая смерть еще до нарушений в кроветворении; степень тяжести IV, прогноз абсолютно неблагоприятный; 3) при дозах более 20 Гр в основном поражаются сосуды и центральная нервная система (ЦНС), клинические формы токсемическая (сосудистая) и церебральная (относящаяся к головному мозгу), степень тяжести IV, прогноз абсолютно неблагоприятный.

Фазность ОЛБ для III степени тяжести (тяжелой): 1) первичная реакция — до 3 — 4 суток; 2) скрытый, т. е. латентный период — 1 — 2 недели; 3) разгар заболевания — 3 — 4 недели; 4) восстановление — 6 — 12 месяцев, возможны рецидивы (возврат).

Для I и II степеней первые две фазы увеличиваются, а для IV — резко сокращаются. Первичная реакция — сразу или через несколько часов после облучения; чем она раньше, тем тяжелее ОЛБ; симптомы: тошнота и рвота, слабость, головная боль,

головокружение, возбуждение психики, сменяемое угнетением, жажда; температура тела нормальная; в тяжелых случаях — одышка, потеря сознания. В скрытый период — мобилизация защитных и компенсаторных механизмов; первичные симптомы исчезают, но изменения в кроветворных органах и биохимических процессах прогрессируют. В разгар заболевания — ухудшение самочувствия и полиморфизм клинической картины из-за поражения всех органов и систем. Выздоровление медленное, долго сохраняются нарушения в функциях органов. Отдаленные последствия ОЛБ (через многие годы) — катаракта (помутнение хрусталика глаза), опухоли, лейкозы, генетические нарушения.

В первую очередь при радиационном поражении необходима эвакуация из зоны заражения, как можно раньше санитарная обработка: сначала помыться холодной водой с моющими средствами, чтобы поры кожи закрылись, а пыль смылась, потом горячей, чтобы поры открылись и смыть остатки пыли, затем опять холодной, чтобы поры закрылись. При рвоте показаны этаперазин по одной таблетке (успокаивающее средство), экстракт валерианы и др. При сердечно-сосудистой слабости — по 20 — 30 капель кордиамина. Профилактика радиационных поражений — это соблюдение правил охраны труда и дозиметрический контроль за работающими с ИИ, систематическое медицинское наблюдение. При угрозе заражения радионуклидами или внешнего облучения — прием радиопротекторов, снижающих воздействие излучения: йодистого калия и цистамина. Эффективны для защиты от РВ, попавших в организм, комплексоны (органические соединения, связывающие ионы металлов в комплексы), адсорбенты, поглощающие другие вещества из раствора или газа; они способствуют выведению радионуклидов из организма.

ЧС с выбросом РВ возможны при авариях на АЭС, предприятиях ядерно-топливного цикла атомной энергетики, на транспорте с ядерными энергетическими установками или при перевозке РВ, при промышленных или испытательных ядерных взрывах.

Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) установлены этапы аварии на радиационно-опасном объекте (РОО): 1) начальный — угроза выброса РВ и первые часы после выброса; 2) первичной ликвидации последствий аварии — от нескольких суток до месяца, когда радионуклиды осели на землю; 3) проведения и завершения работ по ликвидации аварии.

Масштабы выбросов РВ при аварии на АЭС можно представить по катастрофе на ЧАЭС (о причинах катастрофы существуют различные версии). Выбросы продолжались с 26 апреля по 7 мая 1986г; рассеялось 2 — 6% от имевшихся в 4-м блоке ~ 200 т радиоактивного топлива, т. е. 4 — 12 т. Произошло радиоактивное загрязнение с уровнем радиации по цезию-137 (Cs-137) более 5 Ku/км^2 около 28 тыс. км^2, а всего 56 тыс. км^2 — это области Белоруссии, Украины, России. Загрязнения обнаруживались от Сухуми до Прибалтики, в Финляндии и Швеции, Франции (о-в Корсика). Облучено 3 млн. чел., в том числе в Белоруссии — 2, 2 млн. чел. или каждый пятый житель, из них 800 тыс. — дети. В ликвидации аварии участвовало 280 тыс. чел. («ликвидаторы»), из них к апрелю 2001 г. умерло 15 тыс. чел., 50 тыс. чел. стали инвалидами. Чернобыльская катастрофа, крупнейшая в атомной энергетике, привела к неблагоприятным экологическим последствиям, потере человеческих жизней, экономическому ущербу, вызвала тревогу в мире. Германия решила закрыть свои АЭС к 2018 г. (Австрия закрыла в 1978 г.).

Разрушенный ядерный реактор ЧАЭС замурован в бетонный саркофаг, но все равно представляет угрозу. 15 декабря 2000 г. Украина закрыла Чернобыльскую АЭС.

Длительность поражающего действия радионуклидов определяется их периодом полураспада, то есть временем, за которое распадается половина имеющегося их количества. У йода-131 этот период 8,1 суток, у стронция-90 около 28 лет, у цезия-137 равен 30 годам, у плутония-239 около 24400 лет.

Особенности очага поражения при аварии на АЭС: большая площадь заражения местности РВ — десятки тысяч квадратных километров; длительное поражающее действие.

Закрыть окно