

как удельная активность B -репера в выбросах относительно высокая, период полураспада небольшой, длительность концентрирования аэрозолей на фильтрах может быть ограничена одним или несколькими часами.

Информацию о концентрации нормируемых радионуклидов в теплоносителе, необходимую для расчетного определения их содержания в газовых выбросах, можно получать в процессе штатного контроля радионуклидного состава теплоносителя или по данным эпизодического развернутого радиохимического анализа.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В. Г. Щербине и В. Т. Короткову за содействие в организации экспериментальных работ, А. Г. Мохначеву и С. К. Капустину за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Н. Г. Радиационная безопасность населения при эксплуатации АЭС. — В кн.: Опыт эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития атомной энергетики. Докл. юбилейн. конф., посвященной XX-летию атомной энергетики. Т. II. Обнинск, 1974.
2. In: Proc. IAEA Symp. on Monitoring of radioactive Effluents from Nuclear Facilities. VIENNA, 1978.
3. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции. М., Высшая школа, 1978, с. 261.
4. Москвин Л. Н. и др. — Атомная энергия, 1973, т. 35, вып. 2, с. 83.
5. Москвин Л. Н. и др. — Атомная энергия, 1979, т. 47, вып. 5, с. 303.
6. Аврамов С. Р. и др. ОИЯИ Р10-9741. Дубна, 1976.
7. Герасимов В. В. и др. Водный режим атомных электростанций. М., Атомиздат, 1976, с. 130.

Поступила в Редакцию 10.07.80

УДК 539.12.04

К вопросу о выборе физико-химической модели дозы радиационного воздействия различных видов излучения

ДУБОВСКИЙ Б. Г.

В качестве универсальной меры воздействия различных видов излучения на вещество (и на организм человека) принимается поглощенная доза — средняя энергия, переданная излучением единице массы вещества. Выбор такой меры неизбежно приводит к введению зависящего от линейной передачи энергии L коэффициента качества излучения Q для определения эквивалентной дозы H . Числовые значения Q определены в результате радиобиологических экспериментов и изменяются в пределах 1—20.

Следует ли для описания воздействия любого вида излучения (рентгеновское и γ -излучения, электроны, протоны, нейтроны, α -излучение, тяжелые частицы и т. д.) искусственно вводить энергетический эквивалент в греях, коэффициенты Q и L ? Ведь сам масштаб поправочного коэффициента качества Q к величине поглощенной энергии, равный 20, т. е. 2000%, вызывает сомнение в правильности рассмотрения, при котором поглощенная организмом энергия в качестве универсального критерия сопоставляется с биологическим эффектом. Введенные искусственно в качестве универсальных нормировочные понятия поглощенной энергии, качества излучения направляют развитие отдельных направлений дозиметрии и радиобиологии по малоперспективному пути и затрудняют понимание теоретических основ дозиметрии.

Для дозиметрии облучения человека вполне достаточно определить значения флюенса излучений с равнообразными спектральными характеристиками, соответствующие годовой предельно допустимой дозе (ПДД). При этом устанавливается

соответствие между флюенсом излучения данного спектрального состава и эквивалентной дозой в зивертах.

Значения флюенса различных видов излучения в широком диапазоне энергии, создающие эквивалентные дозы, равные годовой ПДД, приведены в НРБ-76, где содержатся все необходимые данные для дозиметрии в любой радиационной обстановке без использования единиц энергии, поглощенной тканью, коэффициента качества излучения и других факторов, только затемняющих связь между облучением и радиобиологическими и медицинскими последствиями.

Данные табл. 7 НРБ-76 свидетельствуют о слабой энергетической зависимости флюенса γ -квантов, создающего ПДД в широком диапазоне энергии. В связи с этим в часто встречающихся случаях только γ - или высокоэнергетического рентгеновского облучения необязательно точно знать спектральный состав и можно достаточно надежно проводить измерения интегральной ионизационной камерой.

Если за основу дозы взята поглощенная энергия, это не приводит к искажению результатов в частных случаях примерно постоянного состава и спектра излучения при неизменном поле облучения, т. е. при количественном изменении дозы, хотя и в этих случаях лучше использовать флюенс и соответственно эквивалентную дозу в зивертах.

Применение универсальных энергетических построений определилось в результате действия двух факторов: фетишизации сформулированного Н. В. Тимофеевым-Рессовским «радиобиологиче-

ского парадокса» (несоответствие малого количества поглощенной энергии излучения разительному биологическому эффекту), а также отсутствия в первоначальный период создания атомной промышленности приборов, способных оперативно измерять состав и спектральные характеристики излучения смешанного состава.

Универсальную концепцию об основополагающем значении поглощенной энергии разных видов излучения различного спектрального состава для определения биологической эффективности удалось легко сформулировать, лишь применяя «могучий» 20-кратный поправочный множитель. С той же степенью достоверности и обоснованности, используя 20-кратный множитель, можно, например, построить универсальную энергетическую шкалу эквивалентности самых различных заболеваний, возбудителями которых являются вирусы и микробы, поскольку при заражении, несомненно, происходит взаимодействие вирусов и микробов с различными клеточными структурами с выделением микроколичества энергии, примерно в тысячи раз меньшего, чем в упомянутом парадоксе. Развитие микротермометрических приборов позволяет осуществить такие измерения, после чего возможно появление, например, «научно» обоснованной следующей энергетической шкалы: одно заболевание раком эквивалентно трем случаям туберкулеза, 10 случаям ангины и т. д.

Количественная дозиметрия не требует каких-либо промежуточных построений между флюенсом и биологическим эффектом. Однако это совсем не исключает поиска физико-химических моделей для объяснения биологических эффектов, происходящих под действием различных излучений. Критерием правильности такой физико-химической модели следует считать степень близости поправочных коэффициентов между количественными характеристиками дозы и биологическим эффектом к единице.

Коэффициент качества Q для протонов, нейтронов и других плотнoионизирующих частиц значительно выше единицы. Это можно объяснить тем, что, хотя концентрация ионов, образующихся в процессе поглощения излучения, достаточно точно определяется поглощенной энергией, сами ионы выполняют только роль «запала» в инициировании свободнорадикальных цепных реакций. При этом энерговыделение в них может существенно превышать энерговыделение в «запальной» ионной части. При небольших дозах γ -излучения отдельные образующиеся ионы инициируют первичные звенья свободнорадикальных цепных реакций. В случае поглощения плотнoионизирующих частиц в ткани создаются качественно новые условия для образования дополнительных звеньев цепной реакции. Особенностью этих условий — образование дополнительных свободных радикалов в ионных треках, причем их количество

пропорционально квадрату концентрации первичных свободных радикалов или квадрату концентрации ионов ($\sim L^2$), а также эффект насыщения при больших дозах D , обусловленный тем, что дальнейшее облучение погибших клеток не вызывает дополнительного воздействия. Эти особенности могут быть выражены с помощью подгоночной формулы $H = D(1 + AL^2e^{-D/D_0})$, по которой для человека $A = 3,2 \cdot 10^{-3}$ (мкм/кэВ)² при нормировке на коэффициент качества Q для нейтронов; $D_0 = 250$ рад (2,5 Гр) — доза, определяющая нижнюю границу лучевой болезни средней степени тяжести; D измеряется в греях (Гр), H — в зивертах (Зв) *.

Одно из возможных направлений поиска подходящей физико-химической модели соответствия биологического эффекта дозе подсказывают радиобиология и лучевая терапия. Сильное влияние факторов на биологический эффект облучения при той же поглощенной дозе можно объяснить только их влиянием на степень разветвленности цепной реакции образования свободных радикалов, т. е. на число звеньев в цепной реакции и тем самым на эффективную концентрацию свободных радикалов в единице массы биологической ткани. Естественно предположить, что это утверждение справедливо не только для лучевой терапии злокачественных опухолей, но и вообще для объяснения механизма биологического действия излучения.

Таким образом, целесообразно ввести понятие эквивалентной обобщенной дозы в качестве количественной меры биологического воздействия на организм различных видов излучения. При этом учитывается ответная реакция организма, включая его способность противоборствовать поражающему действию радиации. Эквивалентная обобщенная доза пропорциональна количеству структурных нарушений молекул биологических клеток (количеству деструкций) и, следовательно, концентрации ионов и свободных радикалов. В составе этой дозы можно условно выделить ионную и свободно-радикальную части.

Эквивалентная обобщенная доза определяет степень реакционноспособности, т. е. значение биологического воздействия различных излучений на организм при учете внешнего и внутренних факторов. Такими факторами являются флюенсы излучений, физико-химические характеристики и биологическое состояние организма (включая температуру и степень обеспечения клеток кислородом), наличие природных и искусственно введенных антиоксидантов в организме, присутствие в нем токсичных и канцерогенных веществ и степень способности иммунной системы репарационно восстанавливать поврежденные клетки. К ток-

* 1 Гр = 100 рад; 1 Зв = 100 бэр.

сичным веществам следует отнести и продукты разложения клеток, погибших в результате облучения.

В приведенном определении эквивалентной обобщенной дозы не учитывается биологическая иерархия различных клеток и частей организма.

Н. М. Эмануэль установил [2—4], что при лучевом поражении, развитии злокачественных опухолей и в процессе старения активную роль играют свободные радикалы. Они генерируют цепные окислительные реакции, разрушающие биологические клетки и способные уменьшать количество природных биологических ингибиторов — антиоксидантов, которые имеются в тканях и регулируют приводящие к репарационным процессам окислительно-восстановительные реакции в клетках. Введение малотоксичных антиоксидантов в организм уменьшает количество свободных радикалов и тем самым обеспечивает возможность защиты от излучений, лечения и профилактики раковых заболеваний. Метод электронно-парамагнитного резонанса (ЭПР) позволяет изучать свободнорадикальные процессы и в определенных случаях может стать одним из методов ранней диагностики рака и контроля за ходом лечения [2].

А. М. Кузин сформулировал [5, 6] положения о включении биохимических механизмов усиления действия радиации путем образования токсичных радиотоксинов, о существовании порога поражающего действия радиации, о стимулирующем действии малых доз облучения на иммунные системы (поскольку излучение выполняет роль спускового устройства), о важности значительного усиления радиобиологических эффектов при одновременном воздействии других физико-химических факторов (синергизма), в частности, при одновременном воздействии радиации и тепла на опухоль.

Значение кислородного эффекта — ослабления лучевого поражения при снижении концентрации кислорода в гипоксических условиях может достигать 3. Кислород является катализатором цепной реакции свободных радикалов. При этом благодаря особенностям строения электронных оболочек как атома, так и молекулы кислорода цепные реакции могут иметь разветвленный характер. Введение в организм веществ, снижающих концентрацию кислорода в клетках, приводит к замедлению обменных процессов и тем самым обеспечивает защитный эффект [5, 7].

Современная дозиметрическая аппаратура, а также методы индивидуального контроля позволяют достаточно точно контролировать флюенсы различных излучений со сложными спектральными характеристиками. Флюенс, соответствующий годовой ПДД, должен выражаться непосредственно в единицах эквивалентной дозы — в зивертах, что позволит исключить из дозиметрических характеристик поглощенную энергию, коэффициент качества и другие промежуточные величины, толь-

ко затрудняющие понимание биологического действия излучений.

Поскольку эквивалентная обобщенная доза пропорциональна количеству деструкций молекул биологических клеток, т. е. выделившейся в ткани энергии, появляется возможность с одинаковой точки зрения рассматривать воздействие любых физико-химических факторов, влияющих на структуру, число звеньев и состав свободных радикалов в цепной реакции, их концентрацию и среднее время жизни с учетом концентраций иницирующих ионов. В это рассмотрение включается ответная реакция организма и его способность противодействовать поражающему действию этих факторов, в том числе и радиации. Сам факт сильного влияния введенных антиоксидантов, гипоксии, температуры и т. д. на биологическую эффективность излучения свидетельствует о том, что свободнорадикальная часть эквивалентной обобщенной дозы значительно превышает ионную, в связи с чем в первом приближении эквивалентная обобщенная доза пропорциональна концентрации свободных радикалов. Таким образом, измеряя методом ЭПР или ЯПР (ядерно-парамагнитный резонанс) концентрацию свободных радикалов в какой-либо части организма, можно определить эквивалентную обобщенную дозу.

Целесообразно исследовать реакцию организма на импульсное облучение, чтобы методом ЭПР оценить репарационную способность иммунной системы справиться с образующимися при импульсе свободными радикалами. Так как импульс облучения должен быть строго нормирован, одновременно можно будет определить уровень фона свободных радикалов в данном организме или в его части, что может оказаться полезным для диагностики. Подобные исследования могут содействовать созданию надежной методики выявления людей с повышенной чувствительностью к излучению. Это позволит уверенно оперировать с понятиями средних значений ПДД для остального персонала. Такая методика позволит в практическом плане рассмотреть вопрос о полезности периодического облучения малыми дозами (на уровне доз при радонотерапии) людей, не обладающих повышенной чувствительностью к облучению, что, согласно работе [5], может повысить иммунную сопротивляемость организма к неблагоприятным факторам внешней среды.

В 1947 г., вскоре после пуска в Лаборатории № 2 АН СССР (ныне ИАЭ им. И. В. Курчатова) первого в Советском Союзе физического ядерного реактора, Игорь Васильевич Курчатов очень подробно и внимательно обсуждал различные аспекты эффективности радиационного воздействия и первый в СССР проект допустимых доз облучения персонала различными видами излучения. При этом он по своему обыкновению находил простые и оригинальные пути проверки представленных

автором настоящей статьи результатов расчетов. Тогда же И. В. Курчатов принял решение о том, что ввиду неясности радиационной обстановки, которая сложится на атомных заводах, на первый период работы для всех видов излучения установить нормы, эквивалентные принятым в то время для рентгеновского излучения, сделав значительный запас только для норм по загрязнению воздуха α -активными аэрозолями. И. В. Курчатов больше всего беспокоился о том, чтобы обеспечить безопасность работ с плутонием. Эти решения И. В. Курчатова были реализованы в совместном отчете Лаборатории № 2 АН СССР и Института биофизики АМН СССР за 1947 год «Толерантные дозы различных видов излучений» (Г. М. Франк, А. А. Летавет, Б. Г. Дубовский, И. С. Панасюк).

И. В. Курчатов лично участвовал в проведении многих дозиметрических измерений и, как всегда, настойчиво добивался предельной ясности в получаемых результатах. При этом он неоднократно обсуждал смысл понятий средних переносимых доз (толерантных, более точное современное определение — предельно допустимые дозы) в расчете

на «среднего» человека, указывая, что использование этих «средних» понятий может привести к опасным для отдельных людей последствиям. В 1952 г. И. В. Курчатов снова напомнил об этом в связи со смертью чл.-корр. АН СССР радиохимика Б. А. Никитина.

Выражаю благодарность И. Н. Засорину за интерес к работе и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-76. М., Атомиздат, 1978.
2. Эмануэль Н. М. Кинетика химическая и биологическая. Наука и человечество. М., Знание, 1978.
3. Эмануэль Н. М. — Кинетика и свободнорадикальные механизмы опухолевого роста. В сб.: Проблемы современной биофизики. М., Знание, 1974, с. 24.
4. Эмануэль Н. М. Химия и физика. М., Знание, 1963.
5. Кузин А. М. Невидимые лучи вокруг нас. М., Наука, 1980.
6. Кузин А. М. Структурно-метаболическая гипотеза в радиобиологии. М., Наука, 1970.
7. Ярмоненко С. И. Радиобиология человека и животных. М., Высшая школа, 1977.

Поступила в Редакцию 23.02.81

УДК 621.039.8.002:621.039.534

Образование некоторых актиноидов при облучении мишеней в ядерном реакторе (^{237}Np , ^{238}Pu , ^{242}Cm , ^{244}Cm)

ГЕРАСИМОВ А. С., КРУГЛОВ А. К., РУДИК А. П.

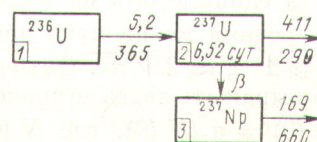
При выгорании топлива в ядерных реакторах образуются актиноиды в результате последовательного захвата нейтронов ^{235}U (такие, как ^{237}Np и ^{238}Pu) и ^{238}U (в частности, ^{242}Cm и ^{244}Cm). Но в отработавшем ядерном топливе энергетических реакторов подобных актиноидов нарабатывается мало [1]. Поэтому для их эффективного получения приходится облучать в ядерных реакторах специальные мишени. Это тем более необходимо в связи с широким использованием указанных актиноидов в народном хозяйстве [1].

В настоящей работе приведены результаты подробного расчета образования ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{242}Cm и ^{244}Cm при облучении мишеней. Расчеты проводились в двухгрупповом приближении, когда скорости реакций определяются только двумя постоянными — тепловым сечением и резонансным интегралом (который, конечно, может блокироваться). Наиболее характерные особенности результатов заключаются в следующем. Во-первых, расчеты проводились для большого числа значений плотности потока тепловых нейтронов и жесткости спектра. Во-вторых, представлены самые различные характеристики процессов: x_k — число ядер требуемого k -го нуклида в расчете на одно заложенное ядро стартового нуклида; Q — удельная активность и R — расход нейтронов на произ-

водство одного ядра требуемого нуклида. В-третьих, некоторые нуклиды обладают сильно блокируемым резонансным поглощением, поэтому существенную роль играет конструкция мишени. В-четвертых, для эффективного производства различных актиноидов необходимо облучение в разных спектрах нейтронов.

Образование ^{237}Np из ^{236}U (рис. 1). Горизонтальные стрелки обозначают α -переход, вертикальная — β -распад ^{236}U ; приведены значения тепловых сечений при 0,0253 эВ и резонансных интегралов для бесконечного разведения от 0,5 эВ (соответственно над и под стрелкой) в единицах 10^{-24} см^2 [2]. Значение периода полураспада ^{237}U взято из работы [3].

Введем число ядер i -го нуклида (в соответствии с нумерацией на рис. 1) $x_i(t)$ в момент времени t . В двухгрупповом приближении $x_i(t)$ удовлетво-



Р и с. 1. Схема образования ^{237}Np из ^{236}U