Галушкин Б.А.

**Характеристика загрязнения приземного слоя атмосферы при разрушении
ядерного реактора АЭС**

*ФГБУ «Государственный Научный Центр Российской Федерации-
Федеральный Медицинский Биофизический Центр им. А.И.Бурназяна»
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-04-2019-223

idsp: ljjournal-04-2019-223

Аннотация

В результате разрушения ядерного реактора АЭС образуется радиоактивный аэрозоль, попадающий в атмосферу. Для оценки доз внутреннего облучения населения необходимо знать радионуклидный состав загрязнения воздуха радиоактивной пылью, дисперсность аэрозоля, соотношение топливных и конденсационных частиц. Приводятся характеристики радиоактивных частиц.

Ключевые слова: авария, ядерный реактор, атомная электростанция, дисперсность, топливо, радионуклид, конденсационные и топливные частицы

Abstract

As a result of the destruction of the nuclear reactor of the nuclear power plant, a radioactive aerosol is formed that enters the atmosphere. To estimate the doses of internal exposure of the population, it is necessary to know the radionuclide composition of air pollution with radioactive dust, aerosol dispersion, the ratio of fuel and condensation particles. The characteristics of radioactive particles are given.

Keywords: accident, nuclear reactor, nuclear power plant, dispersion, fuel, radionuclide, condensation and fuel particles

При нормальной эксплуатации АЭС, выбросы радиоактивных веществ (РВ) в окружающую среду, как правило, не превосходят нескольких процентов от допустимых [1]. Однако при аварийных ситуациях и особенно при крупных авариях (разрушениях) картина может кардинально меняться.

При обычных авариях (например, при разрыве трубопроводов или потере электропитания блока АЭС) происходит разгерметизация твэлов, нагрев и плавление топлива активной зоны (АЗ) реактора и выход радионуклидов в окружающую среду в зависимости от температуры топлива и барьеров, препятствующих такому выходу [2]. Однако существует другой сценарий развития аварийных событий на реакторе. Этот сценарий предусматривает выброс части топлива АЗ в окружающую среду, например в результате взрыва вследствие активного внешнего воздействия на АЭС или других причин, как это было при аварии на Чернобыльской АЭС.

При крупномасштабных авариях (разрушениях) с выбросом части топлива активной зоны (АЗ) реактора АЭС в окружающую среду источник ионизирующего излучения становится неконтролируемым и поэтому необходимо постараться предотвратить или ограничить все пути облучения людей, в том числе ингаляционные. Степень радиационной опасности аварии для населения определяется количеством и радионуклидным составом выброшенных во внешнюю среду РВ, расстоянием от источника выброса до населенных пунктов, характером их застройки, плотностью населения, метеорологическими условиями, сезоном года и многими другими факторами.

Следует заметить, что в международных документах по защитным мерам населения не предусмотрено использование специальных средств индивидуальных средств органов дыхания (СИЗОД), кроме подручных. Это, по всей видимости, связано с недооценкой возможных последствий аварии, особенно с выбросом высокодисперсного топлива АЗ реактора (авария на ЧАЭС), а также с наличием определенных материальных затрат на обеспечение населения такими средствами.

Наиболее сложные проблемы в области защиты населения возникают на ранней фазе развития аварии в процессе формирования радиоактивного следа и при эвакуации населения, которая в зависимости от конкретной радиационной обстановки может проводиться на различных временных стадиях ранней фазы аварии (до нескольких дней).

На средней и поздней фазе аварии ингаляционное поступление РВ возможно в небольших количествах только при проведении работ, сопряженных с большим пылеобразованием или вторичным пылеподъемом. Необходимость защиты органов дыхания населением при запроектной аварии на АЭС на ее ранней фазе не вызывает сомнения. В качестве примера крупномасштабного аварийного выброса можно привести пример аварии на Чернобыльской АЭС. Выбросы радионуклидов в результате этой аварии имели серьезные последствия в Советском Союзе и послужили причиной серьезных опасений общественности в большей части Западной Европы. Время и продолжительность процессов выбросов были необычными в сравнении с оценками, произведенными на основе анализа последствий крупных аварий, выполненного для реакторов других типов. Кроме того, радионуклидный состав и характер выброшенных материалов существенно отличался от данных, полученных на основе анализов предыдущих аварий. Выброс радионуклидов, наблюдавшийся во время аварии на ЧАЭС, представляет собой уникальный случай, заставляющий по новому рассмотреть оценки параметров и источников выбросов радионуклидов при серьезных запроектных авариях или разрушении реактора внешними воздействиями, в том числе преднамеренными.

Согласно НБР-99/2009 [3] радиоактивные изотопы по их радиационной опасности, как потенциальные источники внутреннего облучения, для целей нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных аэрозолей (и их химические соединения) разделены следующим образом в зависимости от скорости перехода радионуклида из легких в кровь:

- тип "М" (медленно растворимые соединения): при растворении в легких веществ, отнесенных к этому типу, наблюдается компонента активности радионуклида, поступающая в кровь со скоростью $0,0001 \text{ сут}^{-1}$;
- тип "П" (соединения, растворимые с промежуточной скоростью): при растворении в легких веществ, отнесенных к этому типу, основная активность радионуклида поступает в кровь со скоростью $0,005 \text{ сут}^{-1}$;
- тип "Б" (быстро растворимые соединения): при растворении в легких веществ, отнесенных к этому типу, основная активность радионуклида поступает в кровь со скоростью 100 сут^{-1} .

Для цели нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных газов выделены типы «Г» (Г1-Г2) газов и паров соединений некоторых элементов, таблица 1.

К типу «М» и «П» отнесены наиболее опасные для организма человека радионуклиды, из которых в облаке выброса при максимальных авариях могут присутствовать альфа-излучающие изотопы: плутоний, америций, кюрий; гамма-излучающие: церий, цирконий, ниобий; бета-излучатель стронций и другие радионуклиды. Радионуклиды йода, цезия как основные дозообразующие изотопы относятся к типу «Б». Радионуклиды йода присутствуют в выбросе в трех физико-химических формах: в аэрозольной, т.е. это радионуклиды, сорбированные на аэрозольных частицах; в газообразной, где основную массу составляет молекулярный йод (I_2); в виде органического соединения — йодистого метила ($\text{CH}_3 \text{I}$), трудно сорбируемого и обладающего высокой проникающей способностью через фильтры. Йод, как продукт деления, образуется в атомарном виде, но уже в теплоносителе присутствует во всех формах. В аварийном выбросе АЭС в атмосферу соотношения между формами йода могут существенно различаться. Соединения йода могут накапливаться в щитовидной железе и создавать значительные дозы облучения.

Инертные радиоактивные газы (ИРГ) и органические соединения йода практически не задерживаются в организме человека и не создают дозу внутреннего облучения.

Распределение аэрозоля в атмосфере обычно описывается логнормальным законом, параметрами которого являются активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) и стандартное геометрическое отклонение (СГО). Знание аналитического выражения для функции распределения размеров аэрозольных частиц и установление характера этого закона имеет большое практическое значение для оценки доз внутреннего облучения людей. Значение аэродинамического диаметра определяется так: 50 % взвешенной в воздухе активности данного аэрозоля связаны с частицами, меньшими чем АМАД, и 50% активности обусловлено частицами, по своему размеру превышающими АМАД. АМАД используется во внутренней дозиметрии для упрощения в качестве 'среднего' значения аэродинамического диаметра, являющегося репрезентативным для аэрозоля в целом и применительно к размерам частиц, при которых осаждение зависит преимущественно от инерционного уплотнения и оседания (т.е. в обычном случае примерно более 0,5 мкм). В случае меньших по размеру частиц осаждение обычно зависит прежде всего от диффузии и при этом применяется медианный по активности термодинамический диаметр (АМТД), имеющий определение, аналогичное АМАД, но применительно к термодинамическому диаметру частиц. Аэродинамический диаметр взвешенной в воздухе частицы – это диаметр, который должна иметь сфера единичной плотности, чтобы ее конечная скорость оседания в воздухе была равна скорости смещения представляющей интерес частицы. Термодинамический диаметр взвешенной в воздухе частицы – это диаметр, который должна иметь сфера единичной плотности, чтобы ее коэффициент диффузии в воздухе был таким же, как у представляющей интерес частицы. Среди методов, используемых для определения характеристик дисперсного состава, особое место занимают те, которые позволяют определять не только размеры аэрозольных частиц, но и другие их свойства (например, химический или нуклидный состав, растворимость, плотность, массу и т.д.). К ним также относятся методы, в которых разделение на фракции по размерам происходит непосредственно в пробоотборном устройстве за счет осаждения частиц на препятствиях (например, импакторы и пакеты волоконистых фильтров). При спектрометрии гамма-излучения большинства пострадавших на ЧАЭС в период аварии было выявлено присутствие более чем 20 радионуклидов. Однако основной вклад в дозу вносили йод-131, цезий-134, цезий-137. В приложении 2 к НРБ-99/2009 [3] приведены численные значения пределов годового поступления с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности во вдыхаемом воздухе для наиболее опасных с точки зрения внутреннего облучения радионуклидов, образующихся при аварии, таблица 2.

Приведенные значения ПГП и ДОО рассчитаны для аэрозолей с логарифмически нормальным распределением частиц по активности при АМАД равным 1 мкм и стандартным геометрическим отклонением, равным 2,5 по моделям, приведенным в Публикации 66 МКРЗ [4].

Таблица 1.

Пределы годового поступления с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности в воздухе для персонала и населения наиболее значимых радионуклидов при аварии или разрушении реактора АЭС

Радионуклид	Период полураспада	Персонал		Население	
		ПГП, Бк в год	ДОО, Бк/м3	ПГП, Бк в год	ДОО, Бк/м3
Стронций-89 (Б)	50,5 сут	2,0+07	8,0+03	1,4+5	1,9+1
(М)		2,7+06	1,1+03		
Стронций-90 (Б)	29,1 год	8,3+0,5	3,3+0,2	2,0+4	2,7
(М)		1,3+05	5,3+01		
Рутений-103 (Б)	39,3 сут	4,1+0,7	1,6+0,4	3,3+5	4,6+1
(П)		8,7+0,6	3,5+0,3		
(М)		7,1+0,6	2,9+0,3		

(Г)		1,8+0,7	7,3+0,3		
Рутений-106 (Б)	368,2 сут	2,5+0,6	1,0+0,3	3,6+4	4,4
(П)		7,7+0,5	3,1+0,2		
(М)		3,2+0,5	1,3+0,2		
(Г)		1,1+0,6	4,4+0,2		
Йод-131 (Б)	8,04 сут	2,6+0,6	1,1+0,3	1,4+4	7,3
(Г1)		1,0+0,6	4,0+0,2		
(Г2)		1,3+0,6	5,3+0,2		
Цезий-134 (Б)	2,1 год	2,9+0,6	1,2+0,3	1,5+5	1,9+1
Цезий-137 (Б)	30 год	4,2+0,6	1,7+0,3	2,2+5	2,7+1
Церий-144 (П)	284,3 сут	5,9+0,5	2,4+0,2	6,3+3	3,3
(М)		4,1+0,5	1,6+0,2		
Плутоний-238 (П)	87,8 год	8,9+0,1	3,7-0,2	2,2+1	2,7-3
(М)		1,3+0,3	5,3-0,1		
Плутоний-239 (П)	2*10 ⁴ год	7,8+0,1	3,2-0,2	2,0+1	2,5-3
(М)		1,3+0,3	5,3-0,1		
Плутоний-240 (П)	6,537 год	7,8+0,1	3,2-0,2	2,0+1	2,5-3
(М)		1,3+0,3	5,3-0,1		
Америций-241(П)	433 год	5,1+0,2	2,1-0,1	2,4+1	2,9-3
Кюрий-244 (П)	18,1 год	8,0+0,2	3,2-0,1	3,7+1	4,6+3

Большинство радионуклидов, имеющих важное значение в радиологическом отношении (Sr, I, Cs, Ce, Pu и др.), присутствуют в воздухе в виде аэрозолей. Одновременно в аэрозольном и парогазообразном состоянии могут находиться радионуклиды йода.

Таблица 2.

Размеры частиц некоторых аэрозолей

Тип аэрозоля	Диаметр, мкм
Табачный дым	0,1 – 1,0
Туман серной кислоты	0,3 – 0,5
Топочный дым	0,1 – 10,0
Слоистые облака	1,0 – 10,0
Факел распыла аэрозольного баллончика	1,0 – 100, 0
Атмосферный туман	2,0 – 50,0
Дождевые облака	10,0 – 100,0
Цветочная пыльца	15,0 – 20,0
Дождевые капли	50,0 – 100,0
Технические	10,0-1000,0

Доза внутреннего облучения зависит также от химических форм вдыхаемого аэрозоля и его дисперсности. В таблице 2 приведены типовые размеры аэрозольных частиц в атмосфере, которые находятся в большинстве случаев в широких пределах от 1 нм (10^{-9} м) до долей мм (10^{-3} м) [4].

Наибольшая биологическая опасность, как видно из таблицы 1, радиоактивных аэрозолей обусловлена прежде всего альфа-излучающими радионуклидами, связанными с частицами топлива, выбрасываемыми в атмосферу при взрыве реактора, как это было в случае аварии 4 блока ЧАЭС.

Согласно данным, приведенным в Публикации 66 МКРЗ [4], дозовый коэффициент может существенно изменяться в зависимости от величины АМАД радиоактивного аэрозоля в пределах двух порядков изменения величины АМАД величина дозового коэффициента изменяется: для α -излучающих нуклидов ^{241}Am , ^{231}U , ^{234}U , ^{241}Pu в 2–3 раза, а для γ -излучающих нуклидов ^{131}I , ^{137}Cs в 1,5–2 раза. При этом имеет место рост дозового коэффициента относительно уровня АМАД = 1 мкм: для α -излучающих нуклидов при АМАД < 1 мкм, а для γ -излучающих нуклидов при АМАД > 1 мкм. В действующих НРБ-99/2009 [3] приведены дозовые коэффициенты внутреннего облучения, рассчитанные для аэрозолей с АМАД, равным 1 мкм, и СГО,

равным 2,5. Однако известно, что в нормальном режиме эксплуатации предприятий ядерного топливного топлива дисперсный состав искусственных радиоактивных аэрозолей на рабочих местах организаций, связанных с производством, переработкой и использованием радиоактивных материалов, характеризуется в основном значением АМАД, равным 5 мкм и диапазоном частиц с d_a от 0,3 до 7,2 мкм на АЭС, от 0,5 до 16 мкм на предприятиях урановой промышленности и от 0,34 до 17 мкм в производстве ядерного топлива. Сильная вариация АМАД (от десятых долей до десятков мкм) α - и β -активных аэрозолей наблюдалась также в приземном слое воздуха в районе ЧАЭС после аварии 1986 г.

Анализ последствий крупных аварий взрывного характера показал, что в образующихся в результате запроектной аварии взрывного характера на АЭС аэрозоли делятся на два класса:

1) I класс - конденсационные частицы с радионуклидами Cs, I, Te, Ru, имеющие невысокую температуру кипения. Другие радионуклиды встречаются в частицах этого типа очень редко. В этом случае АМАД аэрозолей может лежать в пределе от 0,3 до 5 мкм. В первые дни после аварии на ЧАЭС радиоактивный йод находился не только в аэрозольной форме, но и в паро - газообразном состоянии, причем последняя доля могла составлять 50-80% от суммарной активности йода в воздухе в ранней фазе развития аварии.

Содержащиеся в такого рода частицах изотопы Cs, Sr, I, Te находятся в биологически доступных, транспортабельных соединениях. Ru находится в такого рода частицах в форме оксидов и характеризуется низкой транспортабельностью в органах дыхания. В зависимости от нуклидного состава, класса растворимости и АМАД аэрозоля для оценки эффективной дозы на все тело используют дозовые коэффициенты. Они позволяют перейти от активности частиц радиоактивного аэрозоля, осаждаемых в отделах дыхательного тракта, к эффективной дозе ионизирующего излучения.

2) II класс - это фрагменты раздробленного при взрыве топлива, обедненные в ряде случаев летучими продуктами деления. Частицы имеют различную степень выгорания. АМАД этих частиц колебался в первые дни после аварии от 1 мкм до 100 мкм. Надежными маркерами этих частиц являются Ce-144, Zr-96, Nb-95, Pu-239, Pu-240.

Выход радионуклидов при нагреве или расплаве топлива существенно зависит от температуры кипения химического элемента [2]. Так малолетучими элементами, находящимися в топливе являются церий, цирконий, ниобий, плутоний и другие элементы. Поэтому, эти тугоплавкие элементы в большей степени остаются в топливе при его нагреве и плавлении, чем улетучиваются в воздух, конденсируясь при этом на атмосферном аэрозоле. В качестве реперного радионуклида выбирается обычно Zr-95 или Ce-144, как наиболее легко регистрируемые методом гамма-спектрометрии. В тоже время, летучие элементы, такие как йод, цезий, рутений и другие, при нагреве топлива еще до взрыва реактора выходят в атмосферу, тем самым обедняя его, и конденсируются на атмосферном аэрозоле, характеристики которого приведены в таблице 2. Поэтому разумно предположить, что в этом случае в конденсационной форме количество тугоплавкого элемента например, церия, будет существенно меньше, чем летучих элементов. Поэтому дозу ингаляционного облучения следует вычислять отдельно для конденсационных частиц D_K и для топливных частиц D_T , а эффективная доза от ингаляции будет равна сумме этих доз.

Таким образом, опасный характер загрязнения воздуха радионуклидами в результате запроектной аварии предполагает необходимость обеспечения в этих условиях надежной защиты от ингаляционного облучения населения, находящегося на небольших расстояниях от источника выброса и определяет необходимость исследования результативности применения существующих средств защиты органов

дыхания с целью снижения дозы внутреннего ингаляционного облучения организма человека.

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Утверждены постановлением Роспотребнадзора от 26 апреля 2010 г. № 40. (Ред. от 16.09.2013 г.). С. 77.
2. Галушкин Б.А. и др. Методический аппарат для разработки типовых сценариев развития запроектных аварий на АЭС с реакторами ВВЭР при планировании и проведении защитных мероприятий для населения // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2018. Т. 63. № 6. С. 27–33.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с. Сан. Пин 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47.
4. Аэрозоли – дисперсные системы: Монография / Чекман И.С., Сырская А.О., Андреева С.В., Макаров В.А. / - X: «Цифровая друкарня №1». 2013. – 100 с.
5. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник/ Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. / - М.: Энергоатомиздат. 1983. – 384 с.
6. ICRP Publication 66. Human respiratory Tract Model for Radiological Protection. – Annals of the ICRP, v.24, №1-3, 1994.

Гребёнкина А.Ю.

Анализ технологий твердого биотоплива из растительного сырья

*ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
университет путей сообщения»
(Россия, Ростов-на-Дону)*

doi: 10.18411/lj-04-2019-224

idsp: ljjournal-04-2019-224

Аннотация

Проведен анализ существующих технологий получения твердого топлива из растительного сырья, с учетом необходимых показателей. Выявлены преимущества использования биотоплива. А так же рассмотрена схема переработки органических отходов.

Ключевые слова: Биотопливо, теплота сгорания, зольность, растительные отходы, азот, хлор

Abstract

The analysis of existing technologies for obtaining solid fuel from vegetable raw materials, taking into account the necessary indicators. Advantages of the use of biofuels. And also the scheme of processing of organic waste is considered.

Keywords: Biofuel, heat of combustion, ash content, plant waste, nitrogen, chlorine

Для сравнения различных видов технологий биотоплива необходимо учесть следующие показатели:

1. Теплота сгорания - влияет на энергетическую способность топлива;
2. Зольность - определяет количество твердого остатка;
3. Точка размягчения – определяет возможность использования топлива в печах с колосниковой решеткой;
4. Наличие азота, хлора и серы определяет количество вредных выбросов, то есть экологичность топлива.

Физико-химические показатели биотоплива полученного из различных видов растительного сырья приведены в таблице 1.