

УДК 677.017.67

ПРОБЛЕМА ДОЗИМЕТРИИ ПРИ АВАРИЙНОМ СОЧЕТАННОМ ОБЛУЧЕНИИ И ВОЗМОЖНОЕ ЕЁ РЕШЕНИЕ НА ПРИМЕРЕ УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ РЯДА РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИИ НА ЧАЭС

Б. А. Бенецкий

Статья посвящена проблеме дозиметрического контроля в условиях аварийного многофакторного облучения при авариях на атомных реакторах, в том числе контроля в режиме реального времени. Предложен алгоритм поправок на вклад в эффективную эквивалентную дозу, кроме основного (гамма) облучения, также и доз внешнего бета-облучения и внутреннего облучения от распада инкорпорированного йода-131.

Ключевые слова: радиация, аварии, дозиметрия, облучение многофакторное.

Поражения при техногенных авариях, в частности, на ядерных реакторах (особенно с разрушением активной зоны) являются результатом воздействия ряда факторов радиационной и нерадиационной природы. Первым и наиболее существенным радиационным фактором является внешнее облучение проникающими компонентами радиационных полей: фотонным (гамма, рентгеновским) и, в ряде случаев, нейтронным излучениями. Гамма-излучение при аварийном облучении, как правило, является основным и может приводить к острой лучевой болезни (ОЛБ) вследствие поражения кроветворных органов. Второй поражающий фактор – внешнее облучение сильно поглощаемым бета-излучением (с глубиной проникновения до 1 и более см). Его воздействие приводит к местной лучевой травме, которая при больших дозах проявляется в форме радиационного (лучевого) ожога. При сочетанном облучении возникает взаимотягчающее влияние лучевого ожога и костно-мозговой травмы [1]. Оно имеет место, даже если радиационный ожог внешне не проявился (субклиническая форма местной лучевой травмы). Подобное наблюдается также и при комбинированных радиационно-

ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а; e-mail: benetsky@yandex.ru.

термических поражений [2]. Третий фактор радиационного поражения – внутреннее облучение и инкорпорация радиоактивных нуклидов вследствие проникновения в организм радиоактивных газов и аэрозолей. Четвертый – загрязнение кожи и слизистых оболочек радиоактивными нуклидами.

Т а б л и ц а 1

Распределение тяжести поражений по их клиническим последствиям при авариях на корабельных ядерно-энергетических установках

Доклиническая форма поражения (без изменения состава крови)	38.2%
Лучевая реакция (временное изменение крови без последствий)	35.8%
Лучевая болезнь первой степени	16.8%
Лучевая болезнь второй степени	2.5%
Лучевая болезнь третьей степени	2.5%
Лучевая болезнь четвертой степени	4.2%

С целью обеспечения радиационной безопасности воздействие всех вышеперечисленных факторов, как по отдельности, так и в совокупности, должно быть ограничено пределами доз (ПД) в соответствии с Нормами радиационной безопасности (НРБ). По совокупности это определяется предельной величиной эффективной эквивалентной дозы E (в среднем за год, за период трудовой деятельности или жизни) [3]. Т.е. максимальной годовой эффективной или (для некоторых органов) эквивалентной дозы техногенного облучения, различной для разных групп персонала и населения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы радиационно-опасных объектов. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется на приемлемом уровне. Нормирование повышенного планированного облучения до четырехкратного превышения ПД также осуществляется определением максимально допустимой эффективной дозы (3.2.2. [3]). Существует, однако, объективное противоречие между требованиями НРБ и реальными возможностями дозиметрического контроля при авариях, особенно в режиме реального времени. Нормами (п.1.3. НРБ-99-2009) установлено: “Требования по обеспечению радиационной безопасности сформулированы для каждого вида облучения. Суммарная доза от всех видов облучения используется для оценки радиационной обстановки и ожидаемых медицинских последствий, а также для обоснования защитных мероприятий и оценки их эффективности”. Фактически же при ядерных и радиационных авариях в режиме реального времени ранее измерялись и теперь мо-

гут быть измерены прямо показывающими приборами только гамма и (при меньшей достоверности) гамма-нейтронные дозы. Необходим же постоянный индивидуальный контроль за накоплением эффективной эквивалентной дозы в самом процессе работ.

Т а б л и ц а 2

Систематизация данных о характеристиках сочетанных радиационных поражений при авариях на судовых ядерных энергетических установках

Средняя эквивалентная доза внешнего гамма-облучения тела $\langle H_\gamma \rangle$, Зв	Средняя эквивалентная доза внешнего бета-облучения кожи $\langle H_\beta \rangle$, Зв	Средняя активность йода-131 в щитовидной железе $\langle A \rangle$ в единицах 10^6 Бк	Отношение средней активности йода-131 к средней гамма-дозе $\langle A \rangle / \langle H_\gamma \rangle$ в единицах 10^6 Бк/Зв	Оценка в линейном приближении отношения $\langle A \rangle / \langle H_\gamma \rangle$ по формуле (1) в единицах 10^6 Бк/Зв	Средняя эквивалентная доза внутреннего облучения от распада йода-131 в щитовидной железе $\langle H_J \rangle$, Зв
1	2	3	4	5	6
0.40 ± 0.05	< 2	1.09 ± 0.17	2.73 ± 0.43	2.73	1.74 ± 0.27
0.65 ± 0.35	< 2	1.5 ± 1.1	2.3 ± 1.7	2.92	2.40 ± 1.76
0.80 ± 0.05	–	1.83 ± 0.36	2.29 ± 0.45	3.04	2.93 ± 0.58
0.95	3.8	2.6	2.74	3.16	4.16
1.40 ± 0.40	6.5 ± 4.5	–	–	–	–
2.75 ± 0.75	25 ± 15	–	–	–	–
4.00 ± 1.00	34 ± 9.0	19.5 ± 6.5	4.9 ± 1.2	5.54	31.2 ± 10.4
9.45	100	92.5	9.8	9.80	148

Паллиативным решением этой проблемы может оказаться оценка общей тяжести радиационного поражения (т.е. оценка эффективной эквивалентной дозы E) на основании измерений дозы воздействия “основного” поражающего фактора (эквивалентной дозы внешнего гамма-облучения тела H_γ) с поправкой на “довесок” иных радиационных воздействий. Предпосылкой к тому являются причинные связи при генерировании источников излучений в случае аварий на ядерных реакторах. Если авария не сопровождается возникновением самопроизвольной цепной реакции, основной причиной возникновения источников радиации является ранее произошедшее деление ядер, сопровождающееся образованием определенного спектра продуктов деления (в том числе радиоактивных нуклидов) и бета-распадами осколков с последующим гамма-излучением.

Т а б л и ц а 3

Оценки эффективных эквивалентных доз, полученных пострадавшими при авариях на ядерных энергетических установках

Средняя эффектив. эквивалент. доза внешнего гамма-облучения тела $\langle E_\gamma \rangle$, Зв	Средняя эффектив. эквивалент. доза внешнего бета-облучения кожи $\langle E_\beta \rangle$, Зв	Средняя эффектив. эквивалент. доза внутреннего облучения от распада йода-131 в щитовидной железе $\langle E_J \rangle$, Зв	Средняя эффектив. эквивалент. доза сочетанного облучения тела (нижний предел) $\langle E \rangle$, Зв	Средний относительный вклад $\langle \Delta E / E_\gamma \rangle$ “неосновных” поражающих факторов, и его линейная интерполяция, % от основного	Тяжесть (последствия) поражения
1	2	3	4	5	6
0.40 ± 0.05	< 0.02	0.087 ± 0.014	0.487 ± 0.052	21.8 ± 2.3 (19.6)	Без симптомов
0.65 ± 0.35	≤ 0.02	0.120 ± 0.088	0.79 ± 0.36	21.5 ± 9.8 (21.5)	Без симптомов
0.80 ± 0.05	~ 0.02	0.147 ± 0.029	0.967 ± 0.058	20.9 ± 1.3 (22.6)	Без симптомов
0.95	0.038	0.208	1.196	25.9 (23.8)	ОЛБ-I
1.40 ± 0.40	0.065 ± 0.045	–	> 1.465 ± 0.403	> 4.6 (27.2)	ОЛБ-I
2.75 ± 0.75	0.25 ± 0.15	–	> 3.00 ± 0.76	> 9.1 (37.6)	ОЛБ-II
4.00 ± 1.00	0.34 ± 0.09	1.56 ± 0.52	5.90 ± 1.13	47.5 ± 9.1 (47.2)	ОЛБ-III
9.45	1	7.4	17.85	88.9 (88.9)	ОЛБ-IV летальный исход

Вследствие этого дозовые характеристики компонентов сочетанного облучения [1], такие как эквивалентная доза внешнего гамма облучения тела H_γ , эквивалентная доза внешнего бета-облучения кожи H_β , активность йода-131 в щитовидной железе (и соответствующая ей эквивалентная доза внутреннего облучения H_J) должны быть коррелированы. Корреляционные характеристики могут быть установлены по результатам, полученным при реальных авариях на корабельных ядерных энергетических установках (ЯЭУ), и основаны на данных инструментальных измерений и медицинских наблюдений (табл. 1–3). Распределение (4.2 в [1]) общей тяжести радиационных поражений,

в силу специфики их формирования при авариях [4], характеризуется преобладанием лёгких форм, (см. табл. 1). Радиационные поражения кожи наблюдались у 42% пораженных. Наличие инкорпорированного йода-131 имело место у всех. Эти последствия сформировались в результате воздействий в дозах, представленных в табл. 2. В столбце 1 табл. 2 представлены гамма-дозы, измеренные дозиметрами. Индивидуальными или дозиметрами в отсеках с учетом времени пребывания. Дозы внешнего бета-излучения (столбец 2) оценены по медико-биологическим показателям – степени поражения кожных покровов и временной зависимости его развития. Активности инкорпорированного йода-131 (столбец 3) измерены в стационаре после эвакуации пострадавших и приведены к начальному значению на основании законов радиоактивного распада и выведения радионуклида из организма. При определении эквивалентной дозы внутреннего облучения от йода-131 использован дозовый коэффициент 1.60 мкЗв/Бк. Оценки погрешностей приведены в случаях, когда имелись соответствующие данные. Жирным шрифтом в табл. 2 и 3 отмечены величины, рассчитанные автором на основании первичных данных. Приближенное описание зависимости отношения средней активности йода-131 к средней эквивалентной дозе внешнего гамма-излучения $\langle A \rangle / \langle H_\gamma \rangle$ от $\langle H_\gamma \rangle$ дается линейной аппроксимацией

$$\langle A \rangle / \langle H_\gamma \rangle = 2.73 + 0.781 \times (\langle H_\gamma \rangle - 0.400) \quad (1)$$

и представлено в столбце 5 табл. 2. Из прямого расчета с использованием первичных данных, полученных при одной из аварий, коэффициент корреляции между гамма-дозой H_γ и активностью йода A составил $\rho = \mathbf{0.50} \pm \mathbf{0.13}$. Приведенные в табл. 2 данные описывают соотношения доз основного (столбец 1) и “неосновных” (столбцы 2, 6) поражающих радиационных факторов в области превышения порога детерминированных эффектов облучения. Оценки проведены по нижнему пределу, что определяется ограниченностью дозиметрического контроля в условиях аварий. Так дозы по нейтронам не измерялись из-за отсутствия инструментальной базы. Это, вероятно, может быть допустимо при отсутствии самопроизвольной цепной реакции. Несмотря на неполноту и разнородность данных, приведенных в табл. 2, они уникальны. На основании этих данных были определены средние значения эффективных эквивалентных доз, формируемых “неосновными” видами излучений и соответствующих зафиксированным дозам внешнего гамма-облучения тела. Они представлены в табл. 3. Первый столбец табл. 2 преобразуется в первый столбец табл. 3 при двух предположениях (которые всегда имеют место на практике, но о которых не упоминают). Поле излучения изотропно, а само излучение обладает достаточно большой проникающей способностью. Чтобы преобра-

зовать второй столбец табл. 2 во второй столбец табл. 3, применялся взвешивающий коэффициент для кожи $W_T = 0.01$. Аналогично, из данных шестого столбца табл. 2 с коэффициентом для щитовидной железы $W_T = 0.05$, получены величины эффективной эквивалентной дозы внутреннего облучения от распада йода-131 (третий столбец табл. 3). Суммирование данных по трем (1–3) столбцам табл. 3 дает в четвертом столбце оценку средней эффективной эквивалентной дозы при сочетанном радиационном поражении тела E . Это – нижняя оценка E с учетом вкладов двух “неосновных” поражающих радиационных факторов. Значимость этих факторов подтверждается медицинской практикой, при которой наблюдались характерные особенности радиационных поражений [1]. В столбце 5 приведены в % их относительные вклады и курсивом – результаты расчетов по интерполяционной формуле, которая определяет средний относительный вклад в долях гамма-дозы:

$$\langle \Delta E / E_\gamma \rangle = 0.215 + 0.0766 \times (\langle E_\gamma \rangle - 0.65). \quad (2)$$

Из формулы (2), в том приближении, что для оценки вклада неосновных факторов в индивидуальную эффективную эквивалентную дозу, можно использовать связь между средними величинами, следует:

$$E = E_\gamma(1 + \Delta E / E_\gamma) \approx E_\gamma(1 + \langle \Delta E / E_\gamma \rangle). \quad (3)$$

Тогда, опуская значки усреднения, имеем для расчетов оценки эффективной эквивалентной дозы формулу

$$E = 0.0766E_\gamma^2 + 1.1652E_\gamma \quad (4)$$

и обратное (4) соотношение

$$E_\gamma = (57.8473 + 13.0548E)^{1/2} - 7.60574, \quad (5)$$

а также на основании

$$dn/dE = dn/dE_\gamma \times dE_\gamma/dE \quad (6)$$

связь между распределениями доз:

$$dn/dE = (0.1532E_\gamma + 1.1652)^{-1} \times dn/dE_\gamma. \quad (7)$$

Т а б л и ц а 4

Статистические данные по дозам облучения в Грях, тяжести и исходу острой лучевой болезни (ОЛБ) у 134 пациентов, пострадавших при аварии на ЧАЭС

Диагности- рованная степень ОЛБ	Диапазон гамма-дозы, соответствующий данной степени ОЛБ, Гр	Количе- ство человек	Ожидаемые последствия по справочнику [6]	Прогноз смертности по [6]	Кол-во умерших по отчетности
1	2	3	4	5	6
первая	1–2	41	Как правило, у 100% выздоровление и при отсутствии лечения	0	1
вторая	2–4	50	Выздоровление наступает у 100% при условии лечения	0	6
третья	4–6	22	Выздоровление возможно у 50–80% при условии специализированного лечения	4–11	7
четвертая	более 6	21	Выздоровление возможно у 30–50% лишь при условии раннего лечения в специализированной клинике	11–15	14
Всего		134		15–26	28

Т а б л и ц а 5

Учет поправки на вклад “неосновных” радиационных факторов в единицах эффективной эквивалентной дозы E в Зивертах

Степень ОЛБ	Диапазон суммы доз в единицах эффективной дозы E для данной ОЛБ, Зв	Количество человек из 134 пациентов в данном (столбец 2) диапазоне	Ожидаемые последствия по справочнику [6]	Прогноз смертности по [6]	Количество умерших по оценке перераспределения по группам ОЛБ
1	2	3	4	5	6
первая	1–2	≥ 25 (22)	Как правило, у 100% выздоровление и при отсутствии лечения	0	0
вторая	2–4	43 (40)	Выздоровление наступает у 100% при условии лечения	0	1
третья	4–6	24 (30)	Выздоровление возможно у 50–80% при условии специализир. лечения	5(6)–12(15)	6
четвертая	более 6	42 (42)	Выздоровление возможно у 30–50% лишь при условии раннего лечения в специализир. клинике	21(21)–29(29)	21
Всего		≥ 134		26(27)–41(44)	28

Таким образом, оценка тяжести аварийных сочетанных радиационных поражений состоит в инструментальном определении эквивалентной дозы наиболее существенного из воздействующих радиационных факторов (гамма-излучения) с добавлением (фор-

мула (3)) в эффективную эквивалентную дозу вклада неизмеряемых доз иных поражающих факторов – бета-излучения и инкорпорации йода-131. Такой расчет может быть выполнен по формулам (3), (4), (7) или с использованием эквивалентной (7) зависимости с дробной степенью:

$$E = 1.2957E_{\gamma}^{1.1402}. \quad (8)$$

Как отмечалось выше, для индивидуальных доз поправки, полученные из соотношений (3) или (7), могут служить лишь оценкой. При этом и сама “основная” индивидуальная доза E_{γ} известна с точностью до десятков процентов, как в силу конечной точности измерений, так и вследствие приближений методов её измерения. Это в определенной степени реабилитирует грубость оценки “неосновных” индивидуальных доз. Более адекватной такая оценка является для коллективной эффективной эквивалентной дозы. Правильность этого утверждения, как и подхода в целом, может быть проверена анализом статистических данных, посвященных тяжести и исходам острой лучевой болезни (ОЛБ) у 134 наиболее сильно пострадавших при аварии на ЧАЭС [5]. Эти данные (табл. 4), и по общему числу, и по распределению умерших по степеням тяжести ОЛБ, находятся в противоречии с хорошо известными (справочными) данными по последствиям острой лучевой болезни [6]. Особенно по уровню смертности при болезнях первой и второй степеней (ОЛБ-1 и ОЛБ-2). В течение первых трех месяцев после облучения он составил 25% от общего числа погибших. По определению, ОЛБ-1 возникает при облучении в дозе ниже минимально летальной и, как правило, проходит даже при отсутствии лечения, а ОЛБ-2 завершается выздоровлением при лечении. Приводимое в национальном докладе [5] объяснение гласит: “В первые 3 месяца умерли 28 человек, при этом 19 из них – в связи с тяжелыми бета-поражениями кожи и 2 человека – от фатальных осложнений лучевой болезни значительной тяжести”. К последней невозможно отнести ни ОЛБ-1, ни ОЛБ-2. Более обоснованной, по-видимому, является версия (эпилог в [1]) о том, что “в условиях аварий на ядерных реакторах сочетанное радиационное поражение представляет собой форму острой лучевой болезни, характеризующуюся взаимоотношающим влиянием острого гематологического синдрома и местных лучевых ожогов”. “Особое место занимает также ингаляционное заражение йодом, а возможно также короткоживущим ^{88}Rb ”. Так или иначе, просто введение поправки на вклад двух “неосновных” радиационных поражающих факторов преобразует табл. 4 в табл. 5. При сравнении данных этих таблиц необходимо учесть, что столбцы 2 и 3 табл. 4 представляют распределение гамма-доз в виде ступенчатой функции,

которое может быть также аппроксимировано экспоненциальной зависимостью:

$$dn/dE_\gamma = 69.64 \exp(-0.3533E_\gamma). \quad (9)$$

Величины вне скобок в столбце 3 табл. 5 получены на основании преобразования гладких распределений тяжести поражений с использованием формул (3), (4), (6), (8), (9). Значения в скобках получены при преобразовании ступенчатой функции распределения по E_γ в ступенчатую функцию распределения по E (формулы (3)–(6)). Данные, приведенные в пятом столбце, демонстрируют возможную погрешность расчета поправки (числа вне и внутри скобок). Прогноз почти полностью согласуется с фактическими данными, приведенными в столбце 6. За исключением одного случая смерти от ОЛБ-2, который может объясняться рядом причин, от погрешности измерений индивидуальной гамма-дозы E_γ в Грехах до “фатального осложнения” лучевой болезни. Во всех других случаях был реализован наименее мрачный вариант прогноза в пятом столбце табл. 5 (почти по минимуму смертности). Это, по-видимому, объясняется своевременностью и высоким качеством медицинской помощи. В целом, результат поправки на вклад “неосновных” радиационных факторов в интерпретацию статистических данных по исходу ОЛБ у пострадавших при аварии на ЧАЭС подтверждает, по нашему мнению, адекватность предложенного способа оценки тяжести сочетанных радиационных поражений.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Е. Е. Гогин, В. М. Емельяненко, Б. А. Бенецкий, В. Н. Филатов, *Сочетанные радиационные поражения. Монография* (М., ППО “Известия”, 2000).
- [2] *Комбинированные радиационные поражения – патогенез, клиника, лечение*. Под редакцией А. Ф. Цыба, М. Н. Фаршатова (М., Медицина, 1992).
- [3] *Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. База нормативных документов* www.complexdoc.ru, Сан Пин 2.6.1.2523-09, 225 С.
- [4] Б. А. Бенецкий, Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(1), 12 (2014).
- [5] *20 лет Чернобыльской катастрофы. Итоги и перспективы её преодоления в России*. Российский национальный доклад. Под общей редакцией С. К. Шойгу и Л. А. Большова (М., ИБРАЭ, 2006).
- [6] А. А. Моисеев, В. И. Иванов, *Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене* (М., Энергоатомиздат, 1990).

Поступила в редакцию 9 апреля 2015 г.