

Измерение эффективной дозы в свете публикации 103 МКРЗ

Ю. Г. КОСТЫЛЕВА, И. П. МЫСЕВ

Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Россия, e-mail: dep24@sniip.ru

Рассмотрены возможности измерения эффективной дозы внешнего облучения, затронутые в Публикации 103 МКРЗ.

Ключевые слова: прямые и косвенные измерения, коэффициенты перехода, Нормы радиационной безопасности.

The problems of external irradiation effective dose measurement possibilities in terms of Publication 103 ICRP are considered.

Key words: direct and indirect measurements, conversion coefficients, Radiation safety standards.

На протяжении многих лет, вплоть до настоящего времени в отечественной метрологии и приборостроении сложилось мнение, что эффективная доза E внешнего облучения является величиной не измеряемой, а так называемой расчетной (возможно повлияла оценка *essentially unmeasurable* аналогичной величины — эквивалента эффективной дозы H_E в докладе 1985 г. [1]). Вместе с тем, эффективную дозу, в отличие от ambientной, используют при рентгенологических обследованиях в медицине.

Цель настоящей статьи — рассмотреть обоснованность указанного мнения с учетом Публикации 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Вопрос обсуждался в [2] и представляет интерес также в сфере безопасности и обороны Российской Федерации.

В действующих и предшествующих Нормам радиационной безопасности (НРБ) приведены таблицы, позволяющие вычислить коэффициенты перехода к эффективной дозе от измеряемых физических величин — характеристик поля излучения. Это подтверждает возможность косвенных измерений эффективной дозы.

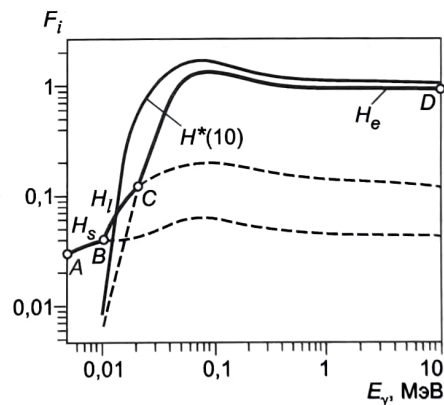
Наиболее полные сведения о коэффициентах перехода к эффективной дозе и другим величинам радиационной защиты содержались в [3]. Указывалось, что эти величины не определяемы прямыми измерениями, но «могут быть связаны с помощью вычислений» с характеристиками радиационных полей, т. е. получены в результате косвенных измерений. Вероятно, из-за такого буквального, а не смыслового перевода эффективную дозу в отечественной литературе и практике стали считать величиной расчетной, т. е. не измеряемой, во что в буквальном смысле поверили многие.

Позднее эффективную дозу измеряли стандартизованным косвенным методом при медицинских рентгенологических исследованиях [4, 5], и согласно [6] «при использовании источников излучения в медицинских целях контроль доз облучения пациентов является обязательным». По имеющимся сведениям в медицине ambientную дозу не измеряют.

Однако примерно в то же время при радиационном контроле персонала [7] отечественными дозиметрами из-

меряемыми величинами служили ambientный эквивалент дозы H^* (10) — для групповых дозиметров, индивидуальный эквивалент дозы H_p (10) — для индивидуальных дозиметров, несколько отличавшиеся от эффективной дозы. (Кстати, правильный перевод с английского и французского языков: «эквиваленты ambientной и индивидуальной доз».)¹ По энергетической зависимости чувствительности такие дозиметры отличались от возможных измерителей эффективной дозы из-за несоответствия используемых коэффициентов перехода требованиям [6, табл. 8.5, 8.8].

К сожалению, отечественные дозиметры эффективной дозы для персонала внедрить не удавалось вследствие ус-



Коэффициенты перехода F_i [10] в геометрии AP для фотонов с энергией E_γ от воздушной кермы K_a к нормируемым i -м дозам H_i с учетом их пределов [H_i]: эффективной H_e , в хрусталиках глаз H_l и в коже H_s (жирная и пунктирные кривые); коэффициенты перехода к эквиваленту ambientной дозы $H^*(10)$ (тонкая кривая) и к нормируемой дозе по стандарту [9] (огибающая ABCD), когда дозиметр позволяет одновременно контролировать указанные пределы [H_i]. В отечественной литературе и практике измеримыми величинами считали $H^*(10)$, H_s и H_p , неизмеримой — H_e . Сохранены обозначения величин, использованные в [10]

¹ См., например, франко- и англоязычные версии названия доклада МЭК [8].

тоявшегося мнения о ее неизмеримости в отличие от амбиентной дозы. Однако трудности подбора необходимых энергетических зависимостей чувствительности тех или других дозиметров были одного порядка и на практике успешно преодолевались. Более того, трудности, обусловленные уменьшением чувствительности дозиметров из-за поглощения регистрируемого излучения при уменьшении энергии фотонов, сказывались даже в меньшей степени (см. рисунок) при измерении эффективной дозы по сравнению с амбиентной. Возможность измерения эффективной дозы внешнего облучения и применение операционных величин рассматривали, например, в [10], где отмечали, что амбиентная доза может быть измерена только дозиметрами с изотропной чувствительностью в угле 4π. Правда, на практике это, как правило, не учитывали.

Ознакомление с Публикацией 103, изданной в переводе на русский язык [11], было сопряжено со сложностями из-за несовпадающей в ее параграфах (их номера указаны в круглых скобках) информации по рассматриваемому вопросу. Для примера в таблице собраны некоторые параграфы в порядке их очередности в [11], в них выделены отдельные места и дополнены примечаниями с учетом следующих соображений:

1. Защитные и операционные величины предпочтительнее измерять косвенным методом, используя коэффициенты перехода [3, приложение 2]. Судя по особенностям таблиц коэффициентов (количеству значащих цифр, значениям энергий) — они расчетные (за исключением нескольких случаев), это отмечено в [3]. Хотя прямые измерения эффективной дозы в настоящее время вряд ли возможны в отличие от измерений операционных величин, это не является принципиальным преимуществом последних, поскольку прямые и косвенные измерения, как известно, равноправны. Напри-

мер, еще в [12, с. 21] отмечали, что «по способу получения числового значения измеряемой величины все измерения делят на четыре основных вида: прямые, косвенные, совокупные и совместные», а также: «находить значения некоторых величин легче и проще путем косвенных измерений, чем путем прямых. Иногда прямые измерения практически невозможно осуществить». Упомянутые виды измерений определены в [13, с. 103, табл. 2]. Заметим, что часто встречающийся в отечественных нормативных документах по радиационному контролю термин «непосредственное измерение»² в [13] отсутствует и, строго говоря, не стандартизован, хотя по смыслу, вероятно, является прямым измерением.

2. Аппроксимировать эффективную дозу с помощью амбиентной дозы можно только в определенных диапазонах энергий фотонов [10] (см. рисунок) и нейтронов [16]. Из [16, с. 54] следует, что среди возможных доз, позволяющих аппроксимировать эффективную, наиболее удачной является доза в гонадах, неудачной — амбиентная, для электронов она непригодна [10].

3. Для фотонов и электронов дозы в коже и хрусталиках глаз, как следует из [6, табл. 8.2, 8.3, 8.6, 8.7], по своим значениям совпадают с соответствующими операционными величинами.

4. Термин «оценка» в [11], вероятно, соответствует менее точным результатам, чем при измерении, но критерий точности не указан, и это не более чем качественная характеристика.

В таблице встречаются случаи применения как коэффициентов перехода, так и (даже в большей степени) операционных величин. Однако с учетом погрешности аппроксимации нормируемых величин операционными предпочтение следовало бы отдавать коэффициентам перехода.

Положения Публикации 103 [11] с примечаниями

Извлечение из Публикации 103	Примечание
(36) При дозах около 100 мЗв в год... использование линейной беспороговой (ЛБП) модели является наилучшим подходом к оценке риска облучения	Такие дозы могут, например, встречаться при планируемом повышенном облучении [6, п. 3.2.2]
(103) ... Следует с осторожностью описывать ситуации, в которых необходимо использовать эффективную дозу, и ситуации, в которых этого делать нельзя. В некоторых ситуациях более приемлемыми являются понятия поглощенной или эквивалентной дозы в ткани	Это не относится к приведенным в таблице параграфам, содержащим положения об измеримости или неизмеримости эффективной дозы
(102) Эквивалентная и эффективная доза в тканях тела и организме человека не может быть измерена напрямую . В связи с этим система защиты включает в себя понятия операционных величин , которые могут быть измерены и исходя из которых можно оценить эквивалентную и эффективную дозы	Это не является недостатком защитных величин, так как они могут быть измерены равнозначным косвенным методом при использовании коэффициентов перехода от физических величин, аналогично измерению операционных величин
(129) Эквивалентная и эффективная дозы не являются практически измеримыми величинами . При профессиональном облучении их значения определяются посредством мониторинга с использованием операционных величин	Эквивалентная и эффективная дозы могут быть практически измерены косвенным методом в условиях облучения, для которых известны коэффициенты перехода от измеренных физических величин к этим дозам
(129) Для расчета коэффициентов при внешнем облучении были использованы математические фантомы, применяемые для оценки дозы в различных полях излучения	Здесь возможна замена термина «оценка» на «измерение»

² Содержится, в частности, в переводе с английского в [14, с. 102 (264)], где указано: «ни эквивалентная доза в органе, ни эффективная доза не могут быть измерены непосредственно» — вместо «не могут быть измерены прямым методом» [15, р. 60 (264)]. Возможно, это приводило к тому, что эффективную дозу считали неизмеримой.

Измерения ионизирующих излучений

Продолжение таблицы

Извлечение из Публикации 103	Примечание
(130) ... Для того, чтобы обеспечить практичность подхода к оценке эквивалентных и эффективных доз, коэффициенты перехода , связывающие их с физическими величинами, например, с потоком частиц или кермой в воздухе для внешнего облучения ..., были рассчитаны для стандартных условий облучения референтных фантомов	Здесь возможна замена термина «оценка» на «измерение»
(136) Операционные величины , используемые при мониторинге среды, включают AMBIЕНТНЫЙ эквивалент дозы $H^*(10)$, направленный эквивалент дозы $H'(0,07, \Omega)$, индивидуальный эквивалент дозы $H_p(d)$...	Как уже указывали, правильный перевод с английского — эквиваленты доз: AMBIЕНТНОЙ, направленной, индивидуальной
(136) Операционные величины являются измеримыми, и оборудование для мониторинга откалибровано в единицах измерения этих величин. При штатном мониторинге значения операционных величин принимаются в виде достаточно точной оценки эффективной дозы и дозы в коже ...	В выражении «единицы измерения величин» термин «измерение» можно исключить. Наиболее точное значение эффективной дозы см. в параграфе (130)
(В е) Защитные величины , ориентированные на организм (эквивалентная и эффективная дозы), не могут быть прямо использованы при радиационном мониторинге, поскольку их невозможно измерить . Вместо E и H_T измеряются операционные величины . При внешнем облучении при индивидуальном мониторинге и мониторинге радиационной обстановки необходимо измерить операционную величину — эквивалент дозы. Измерения при мониторинге радиационной обстановки проводятся в открытом пространстве, а индивидуальные дозиметры носят на теле	См. первое по порядку примечание к параграфу (129)
(В е) Поля излучения, которые «видят» эти дозиметры, различны и для их описания следует использовать различные операционные величины	Представляется, что результаты измерений индивидуальными и групповыми дозиметрами в одинаковых полях должны, в принципе, совпадать, а не заведомо различаться. Предпочтительно следовать параграфу (130)
(В е) Были рекомендованы величины эквивалента дозы, основанные на дозах, измеренных на глубине 10 мм и 0,07 мм в сфере МКРЕ или теле человека, соответственно	См. первое по порядку примечание к параграфу (136)
(В е) При внешнем облучении значения E и доз в органах рассчитываются с помощью коэффициентов перехода	Предпочтительный метод
(В h) Основное применение E находит при проверке соблюдения пределов дозы. В этом смысле она служит для ограничения и регулирования выхода стохастических эффектов при облучении в диапазоне малых доз и такое ее применение нашло мировое признание	Такая проверка, в принципе, требует измерения эффективной дозы
(В 11) Эффективная доза в организме человека не может быть измерена напрямую. Поэтому система защиты включает в себя операционные величины , которые могут быть измерены напрямую и использованы для оценки эффективной дозы. МКРЕ разработала ряд операционных дозовых величин для внешнего облучения (Публикация 74 МКРЗ). Анализ, данный в Публикации 74, указывает на то, что ... операционные ... величины ... достигают своей цели, обеспечивая радиационную защиту «измеримыми величинами, которые адекватно представляют защитные величины»	Только в определенных диапазонах энергий. См. (102), (130), рисунок
(В 92) ... При внешнем воздействии фотонов низких энергий (рентгеновское излучение менее 30 кВ) такое излучение сильно ослабляется тканью вблизи поверхности тела, и его вклад в эффективную дозу обычно невелик. Исключением является использование низкоэнергетических фотонов в процедурах рентгенодиагностики, таких как маммография. В этом случае, при мониторинге и оценке эффективной дозы используются операционные дозовые величины $H^*(10)$ и $H_p(10)$... Для фотонов с энергиями от 10 до 40 кэВ и при фронтальном облучении (AP) тела $H^*(10)$ до 6 раз превышает E , а для других направлений падения излучения на тело (PA, LAT, ROT, ISO) этот консерватизм (т. е. превышение) оказывается еще выше	При столь больших значениях $H^*(10)/E$ оценка эффективной дозы E по эквиваленту $H^*(10)$ на практике представляется проблематичной

Отметим, что с позиций отечественной метрологии предпочтением прямых измерений косвенным, как это следует из таблицы, не оправдано, скорее наоборот. Например, нормируемые и операционные величины на практике определяют методом косвенных измерений с учетом [3].

В [11, с. 9] полагали, что «пересмотренные Рекомендации не касаются каких-либо принципиальных изменений политики в области радиационной защиты». Однако в предшествовавшей Публикации 60 МКРЗ [14] не было указано на неизмеримость эффективной дозы (см. также примечание 2). Отмечали [14, (271)]: «на рабочем месте погрешность в пределах коэффициента 1,5 считается обычной при оценке годовых доз от внешнего облучения», а в «хороших лабораторных условиях» — 10 % (0,95). Признание обсуждавшихся в [14] величин «значительно упростит международные сравнения доз, поможет в разработке технических нормативов для проектирования приборов и их характеристик» [14, (235)].

До настоящего времени не подвергается сомнению или уточнению положение о неизмеримости эффективной и эквивалентной доз [17] и не рассматриваются поверочные схемы для средств косвенных измерений этих доз и операционных величин [18], что подтвердило бы их одинаковый метрологический статус.

Таким образом, следует признать, что эффективная доза может быть измерена косвенным методом при известных условиях облучения, для которых рассчитаны коэффициенты F_i , перехода к ней от измеряемых физических величин — характеристик поля излучения (см. рисунок).

Л и т е р а т у р а

1. **ICRU Report 39.** Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources.

2. **Костылева Ю. Г., Мысев И. П.** Об измерении эффективной дозы в публикации 103 МКРЗ // Тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. М., 2010. Ч. I. С. 154—157.

3. **ICRP Publ. 74.** Conversion Coefficient for Use in Radiological Protection. 1995.

4. **МУК 2.6.1.760—99.** Определение индивидуальных доз облучения пациентов при рентгенологических исследованиях с использованием измерителей произведения дозы на площадь.

5. **МУК 2.6.1.962—2000.** Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях.

6. **НРБ—99.** Нормы радиационной безопасности.

7. **МУ 2.6.1.016—2000.** Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в контролируемых условиях обращения с источниками излучения. Общие требования.

8. **CEI/IEC 60846.** Instrumentation pour la radioprotection — Appareils de mesure de l'équivalent de dose ambiant neutron (ou de son débit d'équivalent de dose); Radiation protection instrumentation — Neutron ambient dose equivalent (rate) meters.

9. **ГОСТ 25935—83.** Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров.

10. **Костылева Ю. Г., Мысев И. П.** О возможности измерения эффективной дозы внешнего облучения и вопросы применения операционных величин // Измерительная техника. 2008. № 5. С. 47; **Kostyleva Yu. G., Mysev I. P.** The scope for measuring the effective dose of external irradiation and the use of operational quantities // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 5. P. 532—540.

11. **Публ. 103 МКРЗ.** Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. М.: ФМБЦ им. А. И. Бурназяна, 2009.

12. **Тюрин Н. И.** Введение в метрологию. М.: Изд-во стандартов. 1976.

13. **Российская метрологическая энциклопедия.** СПб.: Лики России, 2001. С. 103.

14. **Рекомендации** международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Публ. 60. Ч. 1 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1994.

15. **ICRP Publ. 60.** Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 1990.

16. **Костылева Ю. Г., Мысев И. П.** Сравнение требований к энергетической зависимости чувствительности дозиметров фотонного и нейтронного излучений в различных Нормах радиационной безопасности // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 49; **Kostyleva Yu. G., Mysev I. P.** Comparison of the requirements imposed on the energy dependence of the sensitivity of photon and neutron radiation dosimeters in different standards of radiation safety // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 2. P. 184—192.

17. **Костерев В. В. и др.** Сравнительный анализ Норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 и Публикации 103 МКРЗ // Труды науч. сессии НИЯУ МИФИ. 2010. Т. 1. С. 116—118.

18. **ГОСТ 8.061—80.** ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и оформление.

Дата принятия 14.03.2011 г.