

А.Н. Гуржиев, С.Н. Гуржиев, В.М. Кораблев, А.В. Кострицкий

ИЗМЕРЕННЫЕ И ВЫЧИСЛЕННЫЕ ДОЗЫ ПРОШЕДШЕГО И ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В работе представлены результаты сравнения измеренных и вычисленных как с помощью Монте-Карло программы GEANT [1], так и с помощью модельного описания доз прошедшего сквозь материал и отраженного от материала рентгеновского излучения. Для снижения дозы облучения пациентов нерабочая мягкая часть рентгеновского спектра (<10 кэВ) поглощается фильтром в рентгенодиагностических аппаратах на выходе из излучателя. При энергиях ≥ 10 кэВ программа

GEANT хорошо описывает прохождение излучения через вещество, что подтверждается в рамках этой работы. Рассмотрена оптическая модель описания прохождения излучения через вещество. Эта модель позволяет, не привлекая аппарат программы GEANT, быстро и с приемлемой точностью оценить величину дозы прошедшего и отраженного излучений при облучении узким расходящимся рентгеновским пучком однородного по химическому составу вещества заданной толщины.

Схема облучения и облучаемые материалы

Схема облучения приведена на рис. 1. Пучок карандашного типа был сформирован свинцовым коллиматором. Измерения мощности экспозиционной дозы производились шведским дозиметром «UnForge» с передней 2π-геометрией регистрации излучения. Сначала дозиметром была измерена мощность экспозиционной дозы прошедшего излучения, затем отраженного.

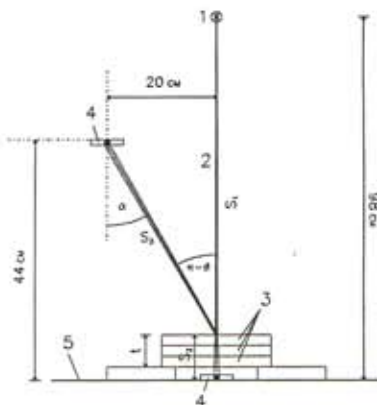


Рис. 1. Схема облучения материалов и измерения доз прошедшего и отраженного излучений.

Обозначения на схеме: 1 – источник излучения; 2 – узкий рентгеновский пучок, сформированный свинцовым коллиматором; 3 – облучаемый материал; 4 – шведский дозиметр «UnForge» с передней 2π-геометрией регистрации излучения; 5 – подложка, на которую устанавливаются облучаемые материалы

Материалы облучались рентгеновским спектром от трубки с вольфрамовым анодом. Рабочее напряжение составляло $U = 100$ кВ.

В качестве облучаемых материалов были взяты:

- оргстекло: глубина наращивалась от 0 до 18 см пластинами толщиной 2 см;
- лист стали толщиной 1,5 мм + 12 см оргстекла;
- лист стекла толщиной 2 см + 12 см оргстекла;
- деревянный брус толщиной 5 см + 12 см оргстекла;
- лист пенопласта толщиной 7 см + 12 см оргстекла;
- локтевая часть руки (~ 7 см) + 12 см оргстекла.

Сталь, стекло, деревянный брус, пенопласт и локтевая часть руки при облучении находились сверху стопки глубиной 12 см, состоящей из 6 пластин оргстекла.

Для каждой конкретной комбинации материалов облучение и измерение мощности экспозиционной дозы производились трижды. Усредненная по трем измерениям оценка мощности экспозиционной дозы бралась как итоговая.

В дальнейшем изложении, если не требуется специальной оговорки, слово «доза» будет означать мощность экспозиционной дозы.

Расчет доз Монте-Карло программой GEANT

В программу GEANT были заложены энергетический спектр [2] гамма-излучения, соответствующий параметрам облучения, химический состав и

геометрия облучаемых материалов. Для каждой конкретной комбинации облучаемых материалов были выполнены расчеты доз прошедшего и отраженного излучений. Для расчетов прохождения излучения через локтевую часть руки плотность костной и мягкой ткани и их химический состав были взяты из [3].

На рис. 2 приведены зависимости доз прошедшего (верхний график) и отраженного (нижний график) излучений от толщины оргстекла. Черные метки соответствуют измерениям, белые – расчетам. Числа на графиках показывают относительные отклонения вычисленных доз от измеренных. Приведенные на графиках ошибки статистические. Средняя величина относительного отклонения вычисленных программой GEANT доз от измеренных составляет для прошедшего излучения 16 %, для отраженного – 9 %. Для графика доз прошедшего излучения наблюдается некоторое отличие наклонов в зависимостях измеренных и вычисленных доз от толщины оргстекла. Это отличие, наиболее вероятно, связано с тем, что в расчетах не заложена находящаяся рядом с рентгеновским аппаратом (на расстоянии около 50 см) бетонная стена, дающая дополнительное отраженное излучение, падающее на слой оргстекла. Задать корректно в программе GEANT химический состав бетонной стены, содержащей железную арматуру, не представлялось возможным. Максимальную прибавку к дозе прошедшего излучения отраженное от стены излучение дает при нулевой толщине оргстекла, минимальную – при 18 см слоя оргстекла. Это наблюдается на рис. 2.

Дозы прошедшего (верхние точки) и отраженного (нижние точки) излучений для различных ма-

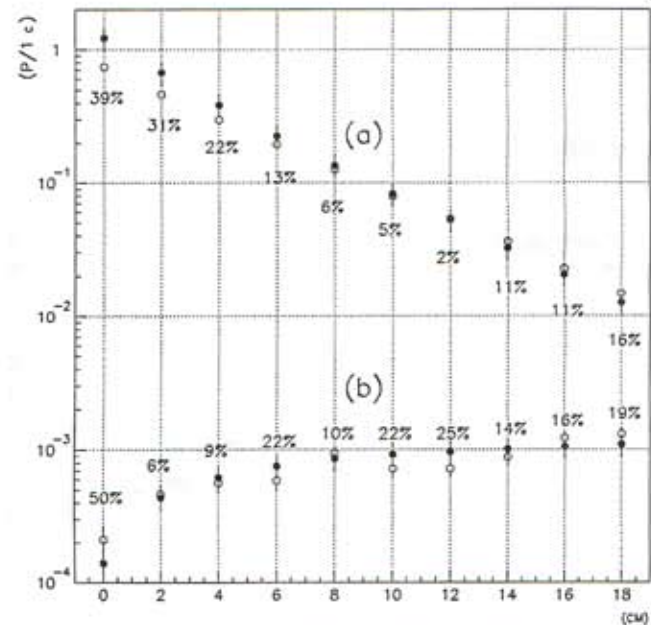


Рис. 2. Мощность экспозиционной дозы (P/1 с) прошедшего (а) и отраженного (б) излучений в зависимости от толщины оргстекла (см). Черные метки – измерения, белые – расчет программой GEANT. В процентах указано относительное отклонение расчетов от измерений

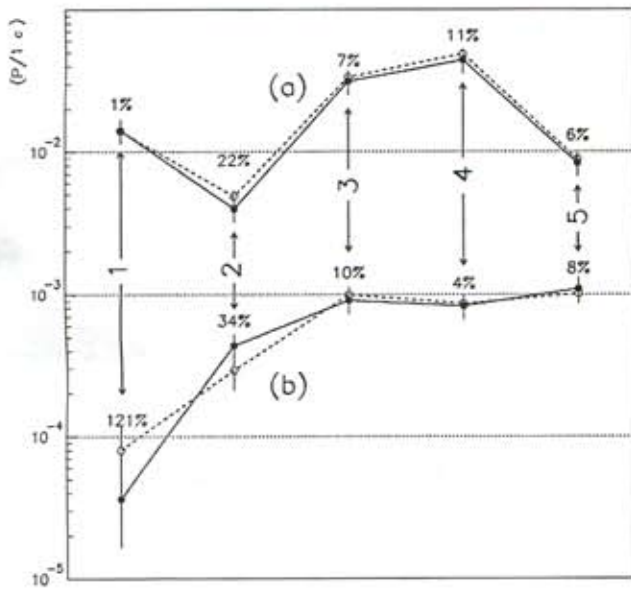


Рис. 3. Мощность экспозиционной дозы ($P / 1 \text{ c}$) прошедшего (а) и отраженного (б) излучений для различных материалов, помещенных на слой оргстекла толщиной 12 см. Материалы: 1 – сталь 1,5 мм; 2 – стекло 2 см; 3 – древесина 5 см; 4 – пенопласт 7 см; 5 – локтевая часть руки 7 см. Черные метки – измерения, белые – расчет программы GEANT. В процентах указано относительное отклонение расчетов от измерений

териалов, помещенных на слой оргстекла толщиной 12 см, графически показаны на рис. 3. Соединение точек отрезками прямых на рис. 3 условное и служит для визуального разделения доз прошедшего и отраженного излучений. Черные метки означают измерения, белые – расчет. Приведенные ошибки статистические. Усредненное по всем материалам относительное отклонение вычисленных доз от измеренных составляет для прошедшего излучения 16 %, для отраженного – 35 %. Наиболее заметно расхождение расчетных и измеренных доз отраженного излучения для стали и стекла. Это обусловлено неадекватностью химического состава стали и стекла, заложенного в расчетах, и их реального химического состава. Облучаемый лист стали имел налет ржавчины неопределенной толщины, что не позволило в программе GEANT корректно учесть поверхностный слой окислов железа. В паспортных данных облучаемого оптического стекла марки К8 химический состав не приведен. Поэтому в программу GEANT для стекла был заложен усредненный химический состав оптических стекол. Поскольку отраженное излучение в большей степени, чем прошедшее, чувствительно к химическому составу материалов, это проявилось в заметном отклонении расчетных доз от измеренных для стали и стекла именно в отраженном излучении.

Проведенный сравнительный анализ измеренных и вычисленных доз прошедшего и отраженного излучений для разных материалов с установле-

нием причин расхождения там, где они имеются, показал, что программа GEANT при адекватном задании в ней химического состава и геометрии материалов является хорошим инструментом для вычисления доз рентгеновского излучения, проходящего через вещество.

Модельное описание доз прошедшего и отраженного излучений

Для однокомпонентной среды прохождения излучения (в данном случае – оргстекло) возможно простое модельное описание доз прошедшего и отраженного излучений. Оптическая модель, о которой будет сказано ниже, позволяет, не привлекая аппарат программы GEANT, быстро и с приемлемой точностью оценить величину доз прошедшего и отраженного излучений при облучении узким расходящимся рентгеновским пучком оргстекла заданной толщины.

В отсутствие оргстекла доза прямого излучения в воздухе на расстоянии от источника $S \ll \lambda$ убывает квадратично с расстоянием (при 100 кВ средняя длина взаимодействия излучения в воздухе $\lambda \sim 45 \text{ м}$):

$$R = \frac{C_D}{S^2} \cdot \exp\left\{-\frac{S}{\lambda}\right\} = \frac{C_D}{S^2} \cdot \left(1 - \frac{S}{\lambda}\right) = \frac{C_D}{S^2}, \quad (1)$$

где C_D – константа.

При облучении оргстекла доза излучения, прошедшего через оргстекло толщиной t , складывается из двух слагаемых:

$$R = R_D + R_S = \frac{C_D}{(S_1 + S_2)^2} \cdot k_t + \frac{C_S}{S_2^2} \cdot k_t \cdot p_\vartheta \cdot \cos \alpha; \quad (2)$$

$$k_t = \exp\left\{-\frac{t}{\lambda}\right\};$$

$$k_t = 1 - \exp\left\{-\frac{t}{\lambda}\right\};$$

$$p_\vartheta = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos^2 \vartheta),$$

где R_D – доза излучения, прошедшего без рассеяния; R_S – доза излучения, прошедшего с рассеянием; C_D, C_S – константы; t – толщина оргстекла; λ – средняя длина взаимодействия излучения в оргстекле; k_t – коэффициент ослабления излучения в оргстекле; k_t – доля первичного излучения, взаимодействующего (дающего рассеянное излучение) в оргстекле толщиной t ; p_ϑ – вероятность комптоновского рассеяния под углом ϑ к направлению первичного излучения; α – угол падения излучения к нормали поверхности дозиметра; $S_1 + S_2$ – расстояние от дозиметра до фокуса первичного излучения (см. рис. 1); S_2' – эффективное расстояние от дозиметра до фокуса вторичного излучения (S_2' не обязательно должно быть равным S_2 , поскольку источник вторичного излучения не является точечным). В выбранной схеме измерений для прошедшего излучения $\vartheta = 0, \alpha = 0$ (см. рис. 1).

Доза отраженного (рассеянного назад под углом ϑ к направлению первичного пучка) излучения имеет только одно слагаемое:

$$R_S = \frac{C_S}{S_3^2} \cdot k_i \cdot p_0 \cdot \cos \alpha; \quad (3)$$

$$k_i = 1 - \exp\left\{-\frac{t + \xi}{\lambda}\right\};$$

$$p_0 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos^2 \vartheta).$$

Здесь в суммарную толщину вещества, дающего рассеянное излучение, добавляется толщина ξ . Это нормированный на длину взаимодействия в оргстекле эквивалент толщины подложки, находящейся ниже слоев оргстекла. S_3 – эффективное расстояние от дозиметра до фокуса вторичного излучения (S_3 не обязательно должно быть равным S_3 , поскольку источник вторичного излучения не является точечным). В выбранной схеме измерений для отраженного излучения $|\cos \vartheta| = |\cos \alpha|$ (см. рис. 1).

В основу модельного описания доз прошедшего и отраженного излучений взята оптическая модель узкого расходящегося пучка света (излучения), в которой фокусом как для преломленного (прошедшего), так и для отраженного света (излучения) является первичный точечный источник света (излучения). Ослабление света (излучения) по мере прохождения вещества описывается формулами (2) и (3). Применительно к нашей задаче фокусы для вторичного прошедшего и вторичного отраженного излучений выражаются как

$$S_2' = S_1 + S_2; \quad S_3' = S_1 + S_3. \quad (4)$$

На больших расстояниях от поверхности раздела двух сред воздух-оргстекло, когда $S_2 \gg S_1$ и $S_3 \gg S_1$, оптическая модель переходит в модель Гюйгенса, в которой фокусом (источником) вторичного излучения является поверхность раздела двух сред:

$$\frac{1}{S_2'^2} = \frac{1}{(S_1 + S_2)^2} = \frac{1}{S_2^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2} = \frac{1}{S_2^2}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{S_3'^2} = \frac{1}{(S_1 + S_3)^2} = \frac{1}{S_3^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{S_1}{S_3}\right)^2} = \frac{1}{S_3^2}. \quad (6)$$

Значения параметров аналитических формул (2), (3), дающих наилучшее согласие при описании этими формулами измеренных доз, получены итерационной процедурой фитирования, минимизирующей отклонение вычисленных по аналитическим формулам доз от измеренных. Значения параметров, полученных в результате фитирования, составили: $C_D = 10685 \pm 489$; $C_S = 12,95 \pm 0,35$; $\lambda = 3,88 \pm 0,07$; $\xi = 1,00 \pm 0,09$.

Результаты описания формулой (2) измеренных доз прошедшего излучения и формулой (3) – доз отраженного излучения графически показаны на

рис. 4. Среднее относительное отклонение модельного описания от измерений составляет 7 %.

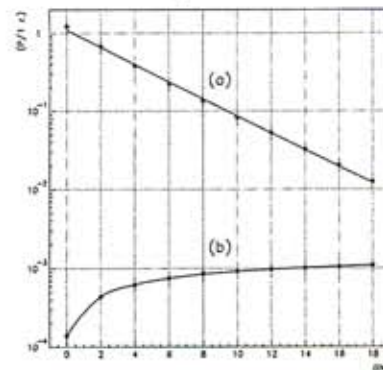


Рис. 4. Мощность экспозиционной дозы ($P / 1с$) прошедшего (а) и отраженного (б) излучений в зависимости от толщины оргстекла (см). Черные метки – измерения, линии – описание оптической моделью. Среднее относительное отклонение модельного описания от измерений составляет 7 %

Заключение

Из проведенного сравнительного анализа вычисленных и измеренных доз прошедшего и отраженного излучений в диапазоне энергий рентгенодиагностических аппаратов и из модельного описания измеренных доз можно сделать следующие выводы:

- в диапазоне энергий рентгенодиагностических аппаратов программа GEANT является хорошим инструментом для описания прохождения излучения через вещество и вычисления доз как прошедшего через различные материалы, так и отраженного от этих материалов излучений;
- оптическая модель прохождения излучения через вещество позволяет, не привлекая аппарат программы GEANT, быстро и с приемлемой точностью оценить величину доз прошедшего и отраженного излучений при облучении узким расходящимся рентгеновским пучком однородного по химическому составу вещества заданной толщины.

Список литературы:

1. GEANT – Detector Description and Simulation Tool. – CERN, Geneva, 1993.
2. <http://www.healthcare.siemens.com/med/rv/spektrum>.
3. Eckerman K.F., Cristy M. and Ryman J.C. The ORNL mathematical phantom series. – <http://homer.ornl.gov/vlab/mird2.pdf>, Dec. 1996.

Алексей Николаевич Гуржиев, ген. директор,
Сергей Николаевич Гуржиев,
канд. физ.-мат. наук, исполнит. директор,
Владимир Михайлович Кораблев,
канд. физ.-мат. наук, программист,
Александр Валерьевич Кострицкий, нач. отдела,
ЗАО «Рентгенпром»,
Московская обл., г. Протвино