

Измеренные и вычисленные дозы от прошедшего и отраженного излучений в диапазоне энергий излучения рентгенодиагностических аппаратов

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

ЗАО "Рентгенпром"

Резюме

В работе представлены результаты сравнения измеренных и вычисленных, как с помощью Монте-Карло программы GEANT [1], так и с помощью модельного описания, доз от прошедшего сквозь материал и отраженного от материала рентгеновских излучений. 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 величины доз от прошедшего и отраженного излучений при облучении узким расходящимся рентгеновским пучком однородного по химическому составу вещества заданной толщины.

1 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 UnForce с передней 2π -геометрией регистрации

излучения. Сначала дозиметром были измерены мощности экспозиционной дозы от прошедшего излучения, затем от отраженного.

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.
- 1.5 мм лист стали + 12 см оргстекла.
- 2 см лист стекла + 12 см оргстекла.
- 5 см деревянный брус + 12 см оргстекла.
- 7 см лист пенопласта + 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 производилось трижды. Усредненная по трем измерениям оценка мощности экспозиционной дозы бралась как итоговая.

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

2 Расчет доз Монте-Карло программой GEANT

В программу GEANT был заложен энергетический спектр [2] гамма-излучения, соответствующий параметрам облучения, химический состав и геометрия облучаемых материалов. Для каждой конкретной комбинации облучаемых материалов выполнены расчеты доз от 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 от толщины оргстекла доз от прошедшего (верхний график) и отраженного (нижний график) излучений. Черные метки соответствуют измерениям, белые расчетам. Числами на графиках приведены 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 от 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 (в ~ 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 от прошедшего излучения отраженное от стены излучение дает при нулевой толщине оргстекла, минимальную при 18 см слое оргстекла. Это качественно наблюдается на Рис.2.

Дозы от прошедшего (верхние точки) и отраженного (нижние точки) излучений для различных материалов, помещенных на 12 см слой оргстекла, графически показаны на Рис.3. Соединение точек на Рис.3 отрезками прямых условное и служит для визуального разделения доз от про-

шедшего 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 от отраженного излучения для стали и стекла. Это обусловлено неадекватностью химического состава стали и стекла, заложенного в расчетах, с их реальным химическим составом. 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 от прошедшего и отраженного излучений для разных материалов с установлением 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 от рентгеновского излучения, проходящего через вещество.

3 Модельное описание доз от прошедшего и отраженного излучений

Для однокомпонентной среды прохождения излучения (в данном случае взято оргстекло) возможно простое модельное описание доз от прошедшего и отраженного излучений. Оптическая модель, о которой будет сказано ниже, позволяет, не привлекая аппарат программы GEANT, быстро и с

приемлемой точностью оценить величины доз от прошедшего и отраженного излучений при облучении узким расходящимся рентгеновским пучком оргстекла заданной толщины.

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

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

В формуле (1) C_D – константа.

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

$$\begin{aligned} R &= R_D + R_S = \\ &= \frac{C_D}{(S_1 + S_2)^2} \cdot k_t + \frac{C_S}{S_2'^2} \cdot k_I \cdot p_\vartheta \cdot \cos \alpha, \quad (2) \\ k_t &= \exp\left\{-\frac{t}{\lambda}\right\}, \\ k_I &= 1 - \exp\left\{-\frac{t}{\lambda}\right\}, \\ p_\vartheta &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos^2 \vartheta). \end{aligned}$$

В формулах выше R_D – доза от излучения, прошедшего без рассеяния, R_S – доза от 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_I – 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 от отраженного (рассеянного назад под углом ϑ к направлению первичного пучка) излучения имеет только одно слагаемое

$$\begin{aligned} R_S &= \frac{C_S}{S_3'^2} \cdot k_I \cdot p_\vartheta \cdot \cos \alpha, \quad (3) \\ k_I &= 1 - \exp\left\{-\frac{t + \xi}{\lambda}\right\}, \\ p_\vartheta &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos^2 \vartheta). \end{aligned}$$

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 (см. Рис.1), 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 от прошедшего и отраженного излучений взята оптическая модель для узкого расходящегося пучка света (излучения), в которой фокусом как для преломленного (прошедшего), так и 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 (см. Рис.1) 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

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

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

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: $C_D = 10685 \pm 489$, $C_S = 12.95 \pm 0.35$, $\lambda = 3.88 \pm 0.07$, $\xi = 1.00 \pm 0.09$.

Результат описания формулой (2) измеренных доз от прошедшего излучения и формулой (3) доз от отраженного излучения графически показан на Рис.4. Среднее относительное отклонение модельного описания от измерений составляет 7%.

Заключение

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

1. В диапазоне энергий рентгенодиагностических аппаратов Монте-Карло программа GEANT является хорошим инструментом для описания прохождения излучения через вещество и вычисления доз как от прошедшего через различные материалы, так и отраженного от этих материалов излучений.
2. Оптическая модель прохождения излучения через вещество позволяет, не привлекая аппарат программы GEANT, быстро и с приемлемой точностью оценить величины доз от 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] K.F.Eckerman, M.Cristy and J.C.Ryman. The ORNL mathematical phantom series. <http://homer.ornl.gov/vlab/mird2.pdf>, Dec. 1996.

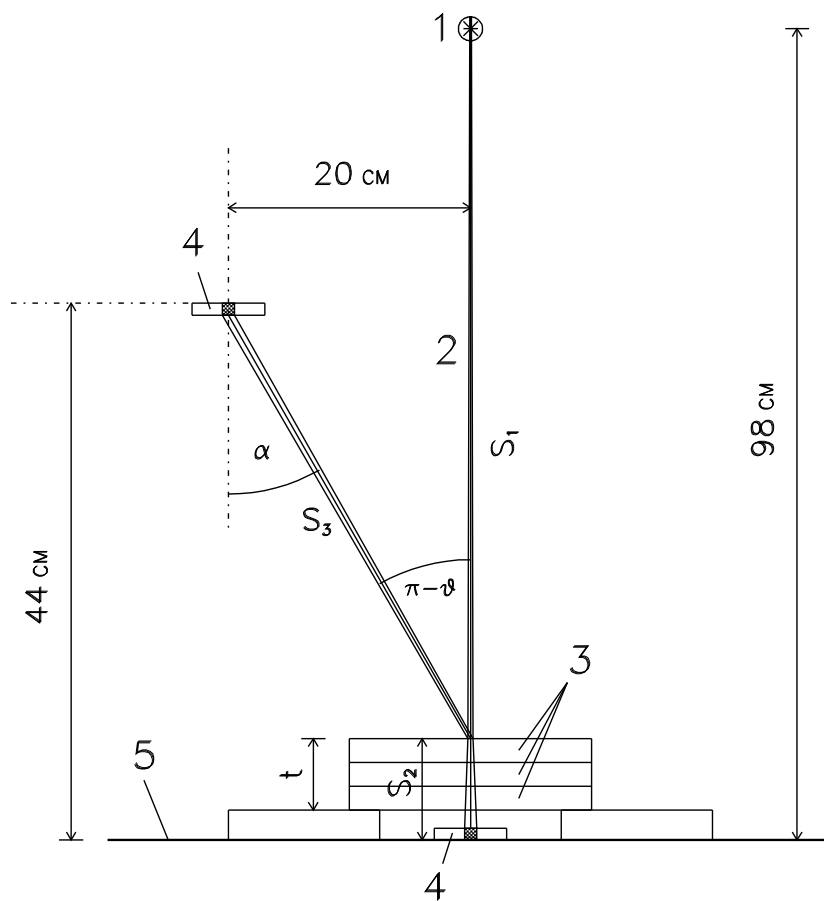


Рис.1 Схема облучения материалов и измерения доз от прошедшего и отраженного излучений. Обозначения на схеме: 1 – источник излучения, 2 – узкий рентгеновский пучок, сформированный свинцовым коллиматором, 3 – облучаемый материал, 4 – шведский дозиметр UnForce с передней 2π-геометрией регистрации излучения, 5 – подложка, на которую устанавливаются облучаемые материалы.

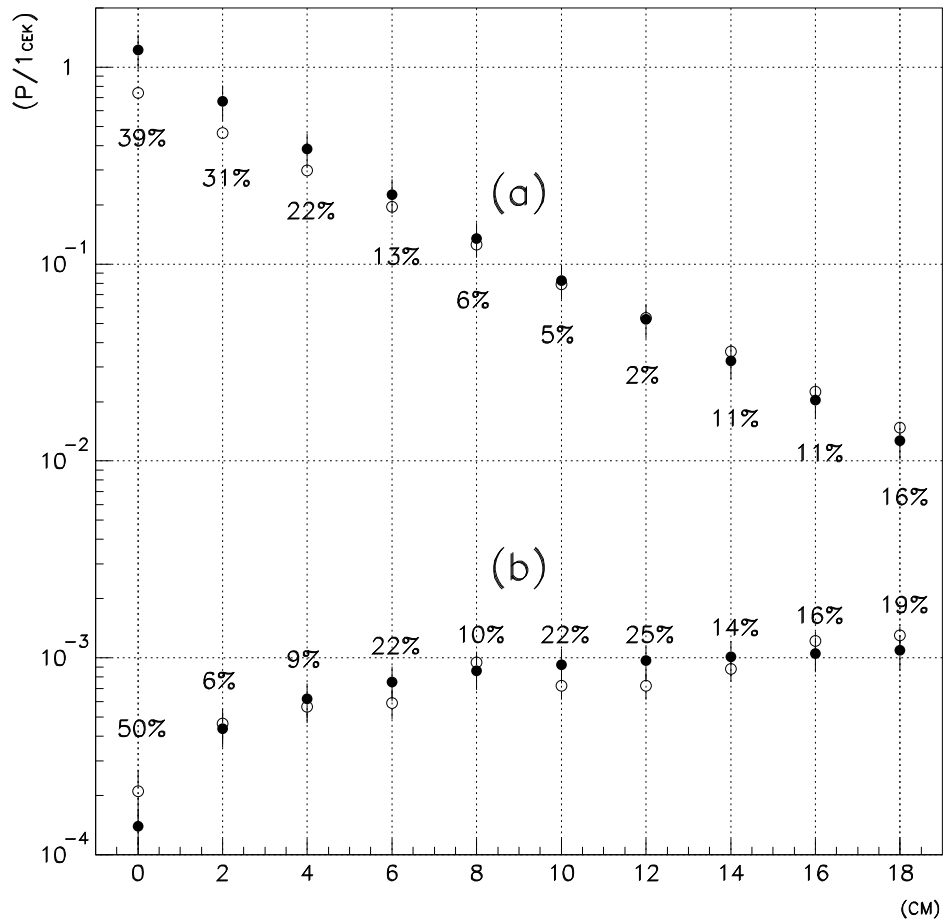


Рис.2 Мощность экспозиционной дозы ($P/1\text{сек}$) от прошедшего (a) и отраженного (b) излучений в зависимости от толщины оргстекла (см). Черные метки – измерения, белые – расчет программы GEANT. В процентах указано относительное отклонение расчетов от измерений.

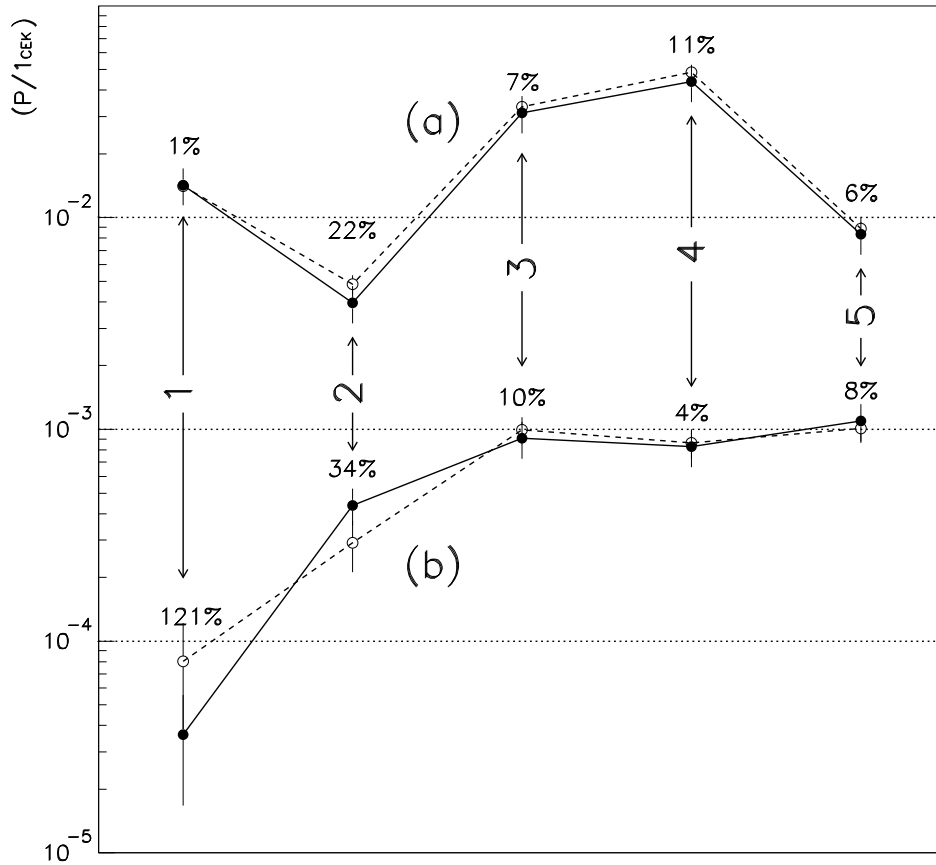


Рис.3 Мощность экспозиционной дозы ($P/1сек$) от прошедшего (a) и отраженного (b) излучений для различных материалов, помещенных на 12 см слой оргстекла. Материалы: 1 – сталь 1.5 мм, 2 – стекло 2 см, 3 – древесина 5 см, 4 – пенопласт 7 см, 5 – локтевая часть руки 7 см. Черные метки – измерения, белые – расчет программы GEANT. В процентах указано относительное отклонение расчетов от измерений.

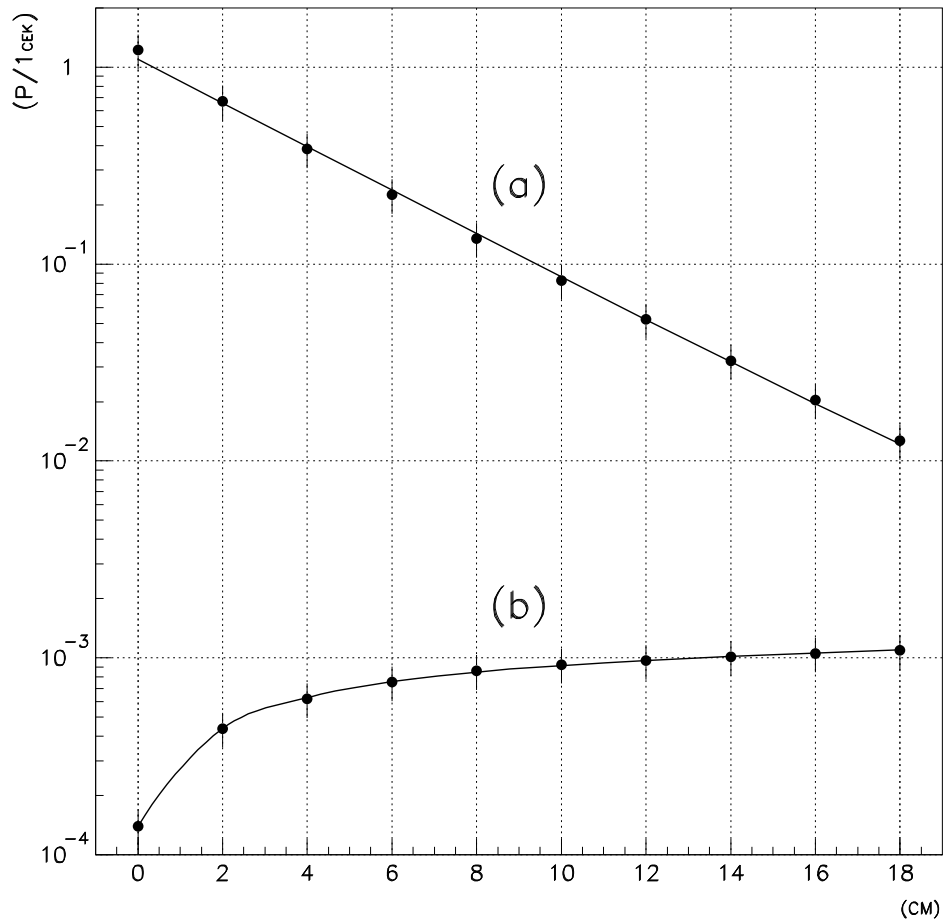


Рис.4 Мощность экспозиционной дозы ($P/1сек$) от прошедшего (a) и отраженного (b) излучений в зависимости от толщины оргстекла (см). Черные метки – измерения, линии – описание оптической моделью. Среднее относительное отклонение модельного описания от измерений составляет 7%.