

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ
АТОМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АСЛАН ЭРДЕМ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА СПЕЦИАЛИСТА

По специальности 14.05.02 «Атомные станции: проектирование,
эксплуатация и инжиниринг»

на тему:

«Ошибки возникающие, при расчетах дозовых характеристик
источников фотонного излучения непрерывного спектра с
использованием понятия эффективной энергии»

Выпускная квалификационная
работа защищена «__»
_____ 2022 г.

Оценка _____

Секретарь ГЭК - _____

Москва – 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ
«ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ»

Кафедра радиационной физики и безопасности атомных технологий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА СПЕЦИАЛИСТА

По специальности 14.05.02 «Атомные станции: проектирование,
эксплуатация и инжиниринг»

на тему:

«Ошибки возникающие, при расчетах дозовых характеристик
источников фотонного излучения непрерывного спектра с
использованием понятия эффективной энергии»

Студент группы С16-161 _____ *Аслан Э.*
Форма обучения: очная (дневная)

Научный руководитель _____ *Дёмин В.М*
доцент, к.ф.-м.н.

Рецензент _____ *Афанасьев В.В.*
доцент, к.т.н.

Зав. кафедрой №1 _____ *Дёмин В.М*
доцент, к.ф.-м.н.

Москва – 2022

Аннотация

Тема: «Ошибки возникающие, при расчетах дозовых характеристик источников фотонного излучения непрерывного спектра с использованием понятия эффективной энергии»

Объём дипломной работы 57 страницы, на которых размещены 39 рисунков и 9 таблиц. При написании диплома использовалось 7 источника.

Целью дипломного проекта является показать какие ошибки отличаются кратностью ослабления, полученная при расчете по эффективной энергии от расчетов при использовании реального спектра.

Дипломной проект содержит спектры ускорители, использованные в расчетах, расчеты дозиметрических величин единицы с использованием нестандартной методики БРИЗ как для эффективной энергии (0,667 МэВ, 2,5 МэВ и 5 МэВ) так и для реального спектра (1-15) МэВ, результаты кратности ослабления (из таблицы Гусева, $E_{эфф}$ и реальный спектр) для бетона, железа и свинца, отношение кратностей ослабления БРИЗ по реальному спектру к табличным значениям из таблицы Гусева, расчет эффективной энергии, методика расчета эффективной энергии, расчеты аппроксимационные формулы для бетона, железа и свинца, заключение и список использованной литературы.

Содержание

Аннотация	3
Введение	6
Гл 1. Источники фотонного излучения непрерывного спектра	7
1.1 Источники рентгеновского излучения с непрерывным спектром..	7
1.2 Защита от фотонного излучения	10
1.2.1 Защитные материалы от фотонного излучения.....	10
1.2.2 Инженерные методы расчета защиты от первичного фотонного излучения.....	13
1.2.3 Расчет защиты с помощью универсальных таблиц	13
1.2.4 Метод конкурирующих линий для расчета защиты от немоноэнергетических источников	15
1.2.5 Защита от рентгеновского излучения и расчет защиты по эффективной энергии спектра.....	16
1.2.6 Расчет защиты от тормозного излучения электронных ускорителей.....	16
Гл 2. Расчеты поглощенных доз с использованием программного комплекса БРИЗ-3.....	21
2.1 Общая структура программы "БРИЗ-3"	21
2.2. Расчеты кратностей ослабления по спектрам и с использованием эффективной энергии.	28
Гл. 3. Расчет эффективной энергии	40
3.1. Методика расчета эффективной энергии	41
3.1.1 Бетон	41
3.1.2 Железо и свинец	44

3.2. Анализ результатов	45
Заключение.....	47
Список используемой литературы.....	49
Приложение.....	50

Введение

Расчет защиты для источников фотонного излучения с непрерывным спектром является трудоемким процессом. Связано это обычно с тем, что спектр разбивается на группы (от нескольких десятков до нескольких сотен, в зависимости от поставленной задачи) и расчет кратности ослабления надо вести по всем группам. Поэтому в практике получила распространение величина, приближено, качественно характеризующая энергетический спектр излучения: эффективная энергия. Эффективная энергия, это энергия фотонов моноэнергетического фотонного излучения, относительное ослабление которого в поглотителе определенного состава и определенной толщины соответствует ослаблению фотонов рассматриваемого немонаэнергетического излучения. Например, в методических указаниях по расчету защиты ускорителя электронов с тормозной мишенью применяется такое понятие [7]. Задачей настоящей работы было показать, какие ошибки возникают при таком подходе, т.е. насколько отличается кратность ослабления, полученная при расчете по эффективной энергии, отличается от расчетов при использовании реального спектра.

Гл 1. Источники фотонного излучения непрерывного спектра

1.1 Источники рентгеновского излучения с непрерывным спектром

Согласно классической электромагнитной теории, когда свободно движущиеся частицы начинают ускоряться, их энергия изменяется, и они испускают излучение. Эти излучения, создаваемые электронами высокой энергии, обычно называются рентгеновскими лучами. Одним из специальных названий этого изменения энергии является излучение тормозного излучения. Это происходит в результате столкновения высокоскоростных электронов с атомом и замедления под его воздействием.

Для получения рентгеновских лучей используются различные источники, такие как рентгеновские трубки, ускорители электронов (бетатроны), радиоактивные изотопы накопители электронов (синхротронное излучение). Рентгеновское излучение возникает только тогда, когда поток быстро летящих электронов в материале мишени замедляется. Мишень - один из электродов электровакуумного устройства.

Рентгеновские трубки делятся на **ионные и электронные**.

Ионные трубки образовались у основания катодных трубок. В трубках из ионного стекла вакуум поддерживается на уровне 10^{-3} мм рт.ст. (миллиметр ртутного столба) [1], и заряженные частицы перемещаются между анодом и катодом. Ускорителем этого движения является разность потенциалов между электродами. В диапазоне от нескольких киловольт до десятков или даже сотен киловольт.

В газе, разряжаемом в трубке, всегда присутствует небольшое количество ионов, которые ускоряются электростатическим полем и летят к катоду. По пути ионы продолжают ионизировать газ, увеличивая количество ионов и электронов.

Основное устройство рентгеновской ионной трубки, как показано на рисунке 1.1[1], состоит в том, что ускоренные ионы бомбардируют катодную пластину, нагревая ее и выбивая электроны. Они, в свою очередь, ускоряются полем и на высокой скорости сталкиваются с материалом анода, где наблюдается рентгеновское излучение.

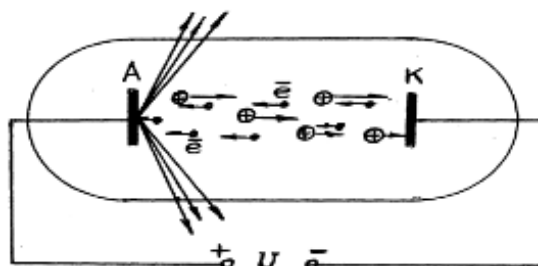


Рис. 1.1. Принципиальное устройство ионной рентгеновской трубки

Площадь поверхности анода, на которой замедляются электроны, называется фокусом трубки, и ее площадь может составлять от нескольких мм² до мкм². Это небольшая часть анода. Рентгеновские трубки с фокусной точкой в один микрон в области фокусной точки называются острофокусными. Рентгеновские трубки с микронным фокусом называются острофокальными. Чем больше фокус трубки, тем ниже качество получаемых рентгенограмм. На стволе имеются тонколистные бериллиевые окна для выхода рентгеновских лучей из трубки.

В электронных трубках свободные электроны создаются путем нагрева специальной катодной спирали. Миниатюрная вольфрамовая спираль нагревается от другого источника тока до температуры 2200-2500 °С и становится источником свободных электронов.

Электроны ускоряются полем и летят к аноду. Учитывая, что длина свободного пробега электронов зависит от степени вакуума в пространстве между электродами, в закрытых электронных трубках создается высокий вакуум 10^{-6} - 10^{-7} мм.рт.ст.

Основное устройство электронной рентгеновской трубки имеет форму 1.2 [1],

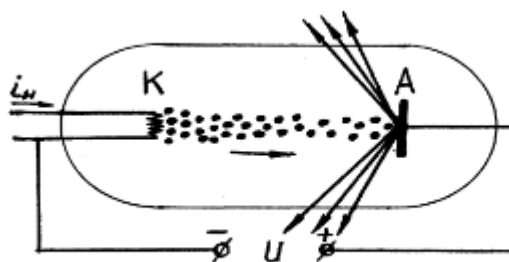


Рис.1.2. Принципиальное устройство электронной рентгеновской трубки

Ускорители- Другим источником с непрерывным спектром излучения являются ускорители частиц. Если мишень бомбардируется протонами, ионами гелия или более тяжелыми ионами, мишень испускает рентгеновское излучение линейного спектра с непрерывным излучением. Для ускорения ионов используются электростатические генераторы или циклотроны.

Источниками мощного рентгеновского излучения являются кольца хранения синхротрона мощностью 0,6-1 ГэВ [1], с литографическими станциями. Такие источники создают высокоэнергетические рентгеновские излучение. Рентгеновское излучение, содержащееся в синхротронном излучении, изолируется монохроматором, и эти излучения используются для различных целей. Интенсивность синхротронного излучения больше излучения рентгеновской трубки.

Однако наиболее широко в настоящее время используются ускорители электронов с энергиями до 100 МэВ. Такие установки применяются при дефектоскопии и в медицине. В качестве мишени, в которой происходит поглощение электронов, используется вольфрам или молибден. В результате взаимодействия электронов с материалом мишени возникает тормозное излучение (природа его та же, что и природа рентгеновского излучения).

1.2 Защита от фотонного излучения

Основной целью защиты является снижение уровня радиации до безопасных пределов. Наиболее важным фактором является безопасность отдельных лиц или общества, в то время как регулируемыми факторами являются допустимые эквивалентные дозы и сила этих доз. Иногда встречаются нормированные уровни, защита высокоточного оборудования или материалов, различные технологические характеристики того или иного вида работ и т.д. В этом разделе будут представлены различные методы для изотропных точечных источников. Они не совсем точны, но в большинстве случаев обеспечивают приемлемую точность и широко используются на практике.

1.2.1 Защитные материалы от фотонного излучения

Ослабление излучения в экране зависит от типа излучения, характеристик источника, относительного положения источника и защищаемого объекта, а также характеристик материала экранирования. При проектировании оптимальной радиационной защиты (с точки зрения веса, размера и стоимости) ядерных установок решающее значение имеет правильный выбор защитных материалов. Следует отметить, что низкая стоимость защитного материала не означает, что общая стоимость защиты невысока. Обладая слабыми защитными свойствами, защитный слой может быть тяжелым, требовать значительных затрат на строительство и ухудшать условия эксплуатации установки.

Рассмотрим защитные материалы, используемые для защиты от гамма-излучения радионуклидов, рентгеновских лучей и тормозного излучения. Основными требованиями к материалам для защиты от фотонного излучения являются [6],

- максимальная плотность и атомный номер, возможные для обеспечения максимального ослабления первичных и вторичных фотонов;

- низкая наведенная радиоактивность защитного материала против фотонов высокой энергии, которые подвергаются ядерным взаимодействиям в защитном материале;
- высокая механическая стойкость защитных материалов и хорошие структурные свойства;
- постоянство защитных свойств во времени;
- невысокая стоимость.

Не всегда удастся выбрать натуральный материал, отвечающий всем требованиям, поэтому создаются искусственные защитные материалы, например, разные виды бетона, неоднородная среда.

Для защиты от фотонов выбор материала защиты в основном определяется типом установки: стационарная или мобильная. В мобильных установках используются свинец, сталь, медь, вольфрам, чугун. Для защиты статических источников излучения используются более дешевые материалы - кирпич, бетон, барит бетон, песок, земля.

Свинец ($\rho = 11,35 \text{ г/см}^3$) - один из лучших материалов для уменьшения фотонного излучения. Он используется везде, где требуется надежная защита, минимальный вес и объем. Свинец используется в виде полос или пластин разной толщины, в виде специальных свинцовых кирпичей. Свинец можно легко превратить в различные защитные контейнеры. В радиологических лабораториях свинец используется для изготовления защитных дверей, будок, экранов. К недостаткам свинца можно отнести его плохие структурные свойства. Материал мягкий с высокой ползучестью, особенно при высоких температурах.

Бетон (Портленд) ($\rho = 2,1-2,4 \text{ г/см}^3$). Это наиболее широко используемый и дешевый защитный материал от фотонного излучения. Для постоянной защиты следует использовать бетон.

Защитные свойства бетона ухудшаются при температурах выше 100°C, что связано с выделением воды, связанной с цементом. Но при высоких температурах используется термостойкий бетон (серпентинит) плотностью 2,3 г/см³.

Мы можем изменить состав бетона, и можно изменить его защитные свойства в довольно широком диапазоне свойств. Увеличьте плотность бетона, заменив гравий более тяжелыми материалами, такими как железная руда, лопнувшая сталь, барит и другие металлические агрегаты. Этот бетон называется тяжелым. Плотность тяжелого бетона колеблется от 3 до 6 г /см³, что значительно повышает его защитные свойства, а также повышает стоимость такого бетона. деконструированный бетон.

Железо ($\rho = 7,87 \text{ г/см}^3$) - используется в защите в виде изделий из стали и чугуна – прокат, поковка, дробь. Сталь углеродистая с легирующими элементами является основным конструкционным материалом для изготовления узлов реакторных установок. Она относится к материалам, в которых хорошо сочетаются конструкционные и защитные свойства. Масса защиты из стали от гамма-излучения на 30 % больше массы эквивалентной свинцовой защиты, однако повышенный расход материала компенсируется лучшими конструкционными характеристиками стали. Под действием тепловых нейтронов железо, являющееся основной составной частью, стали, активизируется с образованием радионуклида ^{59}Fe ($T_{1/2} = 45, 1 \text{ сут.}$).

Вольфрам ($\rho = 17...19 \text{ г/см}^3$). Вольфрам используется в виде порошка, пропитанного медью и спеченного при высокой температуре. Плотность падает до 15... 16 г/см³. По весу количество меди в этих сплавах составляет до 8%. Вольфрамовые сплавы стоят дорого и поэтому рекомендуется использовать их в мобильных установках. Вольфрамовые сплавы используются для защиты от высокоэнергетического излучения, особенно на важных объектах. Они используются для изготовления диафрагм,

радиационных головок, коллиматоров, передающих гамма-лучи, и терапевтических устройств, использующих ионизирующее излучение.

1.2.2 Инженерные методы расчета защиты от первичного фотонного излучения

Методы расчета защиты, конкретные формулы, номограммы и таблицы благодаря этому позволяют нам быстро и точно находить нужную толщину защиты. В частности, эти методы используются для точечных и изотропных источников. Однако в нем доступно множество расширенных ресурсов. Это излучение, которое имеет распределение энергии и угол источника с первичным (прямым) излучением и падает непосредственно на экран источника, не рассеивая его заранее на каком-либо объекте. Все методы, которые мы рассматриваем, являются приближительными.

Эти методы, с помощью которых мы можем найти толщину защиты, как в приведенном ниже списке [3]:

- Характеристики некоторых радионуклидов как гамма-излучателей,
- Защита временем, количеством, расстоянием,
- Расчет защиты с помощью универсальных таблиц,
- Расчет защиты с помощью номограмм,
- Расчет защиты от плоских и точечных изотропных источников по слоям ослабления,
- Метод конкурирующих линий.

1.2.3 Расчет защиты с помощью универсальных таблиц

Взаимосвязь между мощностью дозы, толщиной экрана и характеристиками источника с учетом излучения, рассеянного в экране, определяется выражением,

$$\dot{H}(d) = 1,09 \cdot \bar{w} \frac{A\Gamma_D}{r^2} \exp[-\Sigma(E_0)d] B_d(E_0, \Sigma d), \quad (1)$$

Где w - взвешивающий коэффициент излучения, A - активность источника, [Бк], Γ_D - постоянная гамма по мощности поглощенной дозы в воздухе, [аГр·м²/(с·Бк)], r - расстояние между точечный изотропный моноэнергетический источник и защита, B_D - дозовый фактор накопления в веществе защиты.

И можно писать также,

$$\dot{H}(d) = \dot{H}(0) \exp[-\sum d + \ln B_D], \quad (2)$$

Где $\dot{H}(0) = 1,09 \cdot \bar{w} \frac{A \Gamma_D}{r^2}$ – мощность эквивалентной дозы на расстояние r от источника в защиты.

При проектировании экрана наиболее частой задачей является определение толщины экрана d , которая обеспечит определенный уровень экспозиции. Но даже для изотропного и моноэнергетического источника решить эту проблему непросто, так как вышеперечисленные уравнения трансцендентно и не может быть решено аналитически.

Мы также можем написать предыдущее уравнение следующим образом,

$$k(E_0, d) = \frac{\dot{H}(0)}{H} (d) = [\sum d - \ln B_D], \quad (3)$$

Где k -кратность ослабления. Это величина показывает во сколько раз ослабляется излучение данной толщиной защитного материала. Кратность ослабления k может быть рассчитана по формуле (3) или получена с использованием таблиц зависимости между толщиной защиты d и кратность ослабления для разных энергий (универсальные таблицы Гусева [4]).

С помощью этих таблиц можно определить [3]:

- Толщину защиты по заданной кратности ослабления дозы (мощности дозы);
- Дополнительную защиту;
- Толщину защиты по заданной активности или гамма эквиваленту

источника;

- кратность ослабления по заданной толщине или набору нескольких слоев защиты из различных материалов.

1.2.4 Метод конкурирующих линий для расчета защиты от немоноэнергетических источников

Благодаря этому методу мы используем его для расчета толщины, необходимой для защиты немоноэнергетических источников.

Пусть немоноэнергетический источник с энергией E_1, E_2, \dots, E_m и соответствующий процентный вклад каждой энергии n_1, n_2, \dots, n_m в дозу (мощность дозы). Если спектр непрерывный, то он делится на несколько частей и определяет в каждом из них эффективную энергию $E_{эфф}$. В то же время необходимо избегать разделения спектра на большое количество энергетических областей, а также не объединять энергии в единую форму со значительно отличающимися сечениями взаимодействия. Нам нужно отсортировать эффективную энергию от большой к малой как $E_1 > E_2 > \dots > E_m$.

Следовательно, для каждой эффективной энергии $E_{эфф}$ с учетом ее относительного вклада определяется требуемая толщина экранирования с использованием одного из методов моноэнергетического излучения, рассмотренных выше. В этом случае получается набор значений толщины защиты: $d_1, d_2, d_3, \dots, d_m$.

Энергия фотонов, требующая наибольшей толщины защиты, называется основной линией спектра. Толщина этой защиты обозначается d_Γ . Энергия фотонов, требующая следующей наибольшей (после основной толщины) толщины защиты, называется конкурирующей линией [3]. Защита толщина определяется:

$$\begin{cases} d = d_\Gamma + \Delta_{1/2}, & \text{если } d_\Gamma - d_k \ll \Delta_{1/2}; \\ d = d_k + \Delta_{1/2}, & \text{если } d_\Gamma - d_k < \Delta_{1/2}; \\ d = d_\Gamma, & \text{если } d_\Gamma - d_k > \Delta_{1/2}, \end{cases} \quad (4)$$

Где $\Delta_{1/2}$ - наибольшее значение слоя половинного ослабления, найденного для главной и конкурирующей линий спектра.

Этот метод чаще всего используется при расчете источников с линейчатыми спектрами. При некоторых усилиях можно его реализовать для непрерывного группового спектра. Однако это крайне трудозатратно.

1.2.5 Защита от рентгеновского излучения и расчет защиты по эффективной энергии спектра

Спектр рентгеновского излучения непрерывен и изменяется по мере прохождения излучения через экран.

Для U_{max} более 300 кэВ удовлетворительная точность может быть получена, если защита рассчитывается с использованием эффективной энергии $E_{эфф.} = 2/3 E_{max}$. Вычисление защиты мы можем рассчитать с помощью универсальных таблиц.

Мощность эквивалентной первичной рентгеновской дозы на расстоянии R от анода за защитой толщины d для данной рентгеновской трубки с радиационным выходом D_T [3],

$$\dot{H}(R, d) = 1,09 \bar{w} \dot{D}_T \frac{i}{R^2} \exp(-\Sigma(E_{эфф.})d) B_D(E_{эфф.}; \Sigma d), \quad (5)$$

$$\dot{H}(R, d) - [\text{мкЗв/ч}]$$

Где w – взвешивающий коэффициент излучения, d – толщина защиты, B_D – дозовый фактор накопления.

1.2.6 Расчет защиты от тормозного излучения электронных ускорителей

Расчет радиационной защиты ускорителя электронов включает три этапа [4]:

- расчет мощностей доз в расчетных точках без радиационной защиты,
- определение необходимых кратностей ослабления полученных мощностей доз, с учетом категории помещений,
- выбор материалов и расчет толщин радиационной защиты, обеспечивающих необходимые кратности ослабления.

При расчете радиационной защиты выделяют три типа ускорителей электронов:

- ускорители технологического и научного назначения, работающие в режиме непрерывного излучения (промышленные ускорители);
- ускорители, работающие в импульсном режиме (импульсные ускорители);
- ускорители для установок медицинского назначения (медицинские ускорители).

Средняя мощность дозы тормозного излучения в точке рассчитывается по следующей формуле [4],

$$P = \frac{P_1(\theta)}{R^2}, \quad P - [\text{мкЗв/ч}] \quad (6)$$

Где $P_1(\theta)$ - Средняя мощность дозы на расстоянии 1 м от источника излучения до расчетной точки, $[\text{мкЗв}\cdot\text{м}^2/\text{ч}]$, θ - угол между направлением пучка электронов и направлением на расчетную точку, R - расстояние от источника до расчетной точки, $[\text{м}]$.

Мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от источника излучения определяется на основании технических данных ускорителя или рассчитывается по формулам:

1)Для промышленных ускорителей [4]:

$$P_1(\theta) = \frac{P_{1,1}(\theta) \cdot J \cdot T_{из}}{T_{см} \cdot K}, \quad P_1(\theta) - [\text{мкЗв/ч}] \quad (7)$$

Где $P_{1,1}(\theta)$ - мощность дозы на расстоянии 1 м от источника излучения под углом θ к направлению пучка электронов при токе пучка 1 мА, $[\text{мкЗв}\cdot\text{м}^2/(\text{ч}\cdot\text{мА})]$, J - ток пучка электронов, $[\text{мА}]$, $T_{из}$ -продолжительность облучения за смену, $[\text{ч}]$, $T_{см}$ - продолжительность смены, ч, K - кратность ослабления дозы излучения в конструкционной защите, входящей в состав ускорителя.

2) Для импульсных ускорителей [4]:

$$P_1(\theta) = \frac{P_{1,1}(\theta) \cdot Q}{3,6 \cdot T_{см} \cdot K}, P_1(\theta) - [\text{мкЗв/ч}] \quad (8)$$

Где Q - суммарный заряд ускоренных электронов за смену, [Кл].

3) Для медицинских ускорителей [4]:

$$P_1(\theta) = \frac{1,0 \cdot 10^6 W \cdot r^2 b(\theta)}{T_{нед}}, P_1(\theta) - [\text{мкЗв/ч}] \quad (9)$$

Где W - рабочая нагрузка, равная произведению средней дозы за 1 процедуру на число процедур облучения в неделю, [Зв в неделю], r - расстояние от источника излучения до изоцентра, [м], $b(\theta)$ - коэффициент выхода излучения из облучаемого объекта в направлении θ , $T_{нед}$ - продолжительность работы всех смен персонала группы А в неделю, [ч].

$$P_{1,1}(\theta) = 6,0 \cdot 10^5 \cdot P_{таб}(\theta), P_{1,1}(\theta) - [\text{мкЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мА})] \quad (10)$$

Где $P_{таб}(\theta)$ - значение из таблицы 2 [4] для выбранных энергии электронов E_0 и материала мишени, [сГр·м²/(мА·мин)].

Средняя за рабочую смену мощность дозы нейтронов на расстоянии 1 м от мишени определяется по формулам:

1) Для промышленных ускорителей [4]:

$$P_1^H(\theta) = \frac{6,25 \cdot 10^{15} \cdot f \cdot J \cdot \alpha}{4 \cdot 10^4 \pi R^2 K_n} \cdot \frac{T_{из}}{T_{см}} = \frac{5,0 \cdot 10^{10} \cdot f \cdot J \cdot \alpha}{R^2 K_n} \cdot \frac{T_{из}}{T_{см}}, P_1^H(\theta) - [\text{мкЗв/ч}] \quad (11)$$

Где f - коэффициент выхода фотонейтронов на 1 электрон (определяется по табл.6 [4], либо по формуле: $f = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot E_0$), α - коэффициент перевода плотности потока нейтронов в мощность эквивалентной дозы ($\alpha = 1,7$ мкЗв·см²·с/ч), K_n - кратность ослабления мощности дозы нейтронов в конструктивной защите ускорителя. Если мы подставим значения f и α в приведенную выше формулу, то получим следующую формулу [4],

$$P_1^H(\theta) = \frac{1,3 \cdot 10^7 \cdot J \cdot E_0}{R^2 \cdot K_H} \cdot \frac{T_{из}}{T_{см}}, \quad P_1^H(\theta) - [\text{мкЗв/ч}] \quad (12)$$

2) Для импульсных ускорителей:

$$P_1^H(\theta) = \frac{1,3 \cdot 10^7 \cdot Q \cdot E_0}{R^2 \cdot K_H \cdot T_{см}} \cdot \frac{T_{из}}{T_{см}}, \quad P_1^H(\theta) - [\text{мкЗв/ч}] \quad (13)$$

3) Для медицинских ускорителей:

$$P_1^H(\theta) = \frac{1,0 \cdot 10^6 \cdot W \cdot r^2 \cdot c}{T_{нед}}, \quad P_1^H(\theta) - [\text{мкЗв/ч}] \quad (14)$$

Где c - отношение мощности эквивалентной дозы нейтронов в изоцентре к мощности дозы тормозного излучения.

Кратность ослабления в защите определяется:

$$K = \frac{P_1(\theta) + P_1^H(\theta)}{R^2 P_{пр}} \quad (15)$$

Где $P_{пр}$ - проектная мощность дозы, [мкЗв/ч].

Значения проектной мощности дозы за радиационной защитой ускорителя рассчитываются исходя из пределов дозы ($ПД$) для соответствующих категорий облучаемых лиц и возможной продолжительности их пребывания в смежных помещениях или на прилегающих территориях с использованием соотношения:

$$P_{пр} = \frac{10^3 \cdot ПД}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{0,3 \cdot ПД}{T \cdot n}, \quad P_{пр} - [\text{мкЗв/ч}] \quad (16)$$

Где 10^3 - коэффициент перехода от мЗв к мкЗв, $ПД$ - предел дозы, [мЗв в год], 2 - коэффициент запаса, T - максимальная доля времени, проводимого людьми в данном помещении, n - коэффициент сменности, учитывающий возможность двухсменной работы ускорителя, 1700 - стандартизованная продолжительность работы персонала за год при односменной работе, часов в год.

Определив необходимую кратность ослабления мощности дозы излучения и эффективную энергию тормозного излучения ($E_{эфф}$), выбирают материал защиты и, с помощью [1](#) - [3](#)[4], находят необходимую толщину радиационной защиты для получения заданной кратности ослабления. Эффективную энергию тормозного излучения ($E_{эфф}$) в зависимости от энергии

электронов (E_0) определяют следующим образом:

$$E_{эфф} = \frac{2}{3} E_0 \quad \text{при } E_0 \leq 1,7 \text{ МэВ}; \quad (17)$$

$$E_{эфф} = \frac{E_0}{2} \quad \text{при } 1,7 \text{ МэВ} < E_0 \leq 10 \text{ МэВ}; \quad (18)$$

$$E_{эфф} = 5 \text{ МэВ} \quad \text{при } 10 \text{ МэВ} < E_0 \leq 15 \text{ МэВ}; \quad (19)$$

$$E_{эфф} = \frac{E_0}{3} \quad \text{при } E_0 > 15 \text{ МэВ}. \quad (20)$$

Ниже приведены таблицы кратностей ослабления для источников тормозного излучения ускорителей с граничными энергиями 1, 5, 10 и 15 МэВ. Соответственно $E_{эфф}$ 0,667, 2,5 и 5 МэВ. Эффективные энергии для граничной энергии 10 и 15 МэВ совпадают.

Таблица 1.1.[4] Толщина защиты из бетона (см) для различных кратностей ослабления k и $E_{эфф}$

k	0,667 МэВ	2,5 МэВ	5 МэВ
100	44,6	71,6	89,8
5×10^2	56,5	92,8	117
10^3	54,5	98,8	129,5
5×10^3	72,8	122,0	157
10^4	77,7	131,0	168
5×10^4	87,5	150,5	194
10^5	92,1	159,0	204,5
5×10^5	102,6	179,0	231
10^6	111,0	188,0	243
5×10^6	118,2	208,0	269
10^7	123,2	216,5	279

Таблица 1.2. [4] Толщина защиты из железа (см) для различных кратностей ослабления k и $E_{эфф}$

k	0,667 МэВ	2,5 МэВ	5 МэВ
100	11,9	21,0	24,6
5×10^2	15,5	27,3	32,3
10^3	17,1	30,0	35,6
5×10^3	20,2	35,8	43,2

10^4	21,7	38,4	46,5
5×10^4	24,9	44,2	53,9
10^5	26,3	46,8	57,8
5×10^5	29,4	52,5	64,4
10^6	30,8	54,9	67,5
5×10^6	34,1	60,7	76,2
10^7	35,3	63,2	78

Таблица 1.3. [4] Толщина защиты из свинца (см) для различных кратностей ослабления k и $E_{эфф}$

k	0,667 МэВ	2,5 МэВ	5 МэВ
100	4,5	11,8	11,5
5×10^2	5,8	15,7	15,5
10^3	6,6	17,3	17,2
5×10^3	8,0	20,9	21,0
10^4	8,6	22,4	22,7
5×10^4	10,0	26,0	26,5
10^5	10,5	27,6	28,2
5×10^5	11,7	31,1	32,1
10^6	12,4	32,7	33,7
5×10^6	13,9	36,2	37,6
10^7	14,4	32,8	39,2

Гл 2. Расчеты поглощенных доз с использованием программного комплекса БРИЗ-3

2.1 Общая структура программы "БРИЗ-3"

Основная сложность использования инженерных методов – трудоемкость расчетов при большом количестве энергетических линий фотонов, а тем более при наличии непрерывного спектра. Однако с появлением в России программного комплекса БРИЗ, а затем и БРИЗ-3 эта задача существенно упростилась.

БРИЗ-3 позволяет проводить расчеты для радионуклидных источников и для источников фотонов которые имеют непрерывное распределение по энергии в диапазоне энергий фотонов источника от 0 до 15 МэВ. БРИЗ-3 дает возможность рассчитывать дозовые характеристики полей фотонного излучения для рентгеновских установок, решать задачи с непрерывными спектрами фотонов реактора.

Из указанных источников фотонов мы можем рассчитать дозу на определенном расстоянии защищенным или незащищенным способом. Например, точечный, объемный источник и т.д.

Для того чтобы произвести расчеты, нам нужно правильно выбрать параметры. Например, в программе БРИЗ-3 нам нужно принять единицу энергии рентгеновского спектра за МэВ. И это также относится к спектру непрерывного фотонного излучения. Используя спектры радиационных спектров рентгеновских установок, мы можем легко рассчитать мощность поглощенной дозы с защитой и без нее.

После установки программы на ноутбук с установленной Windows откроется следующий экран.

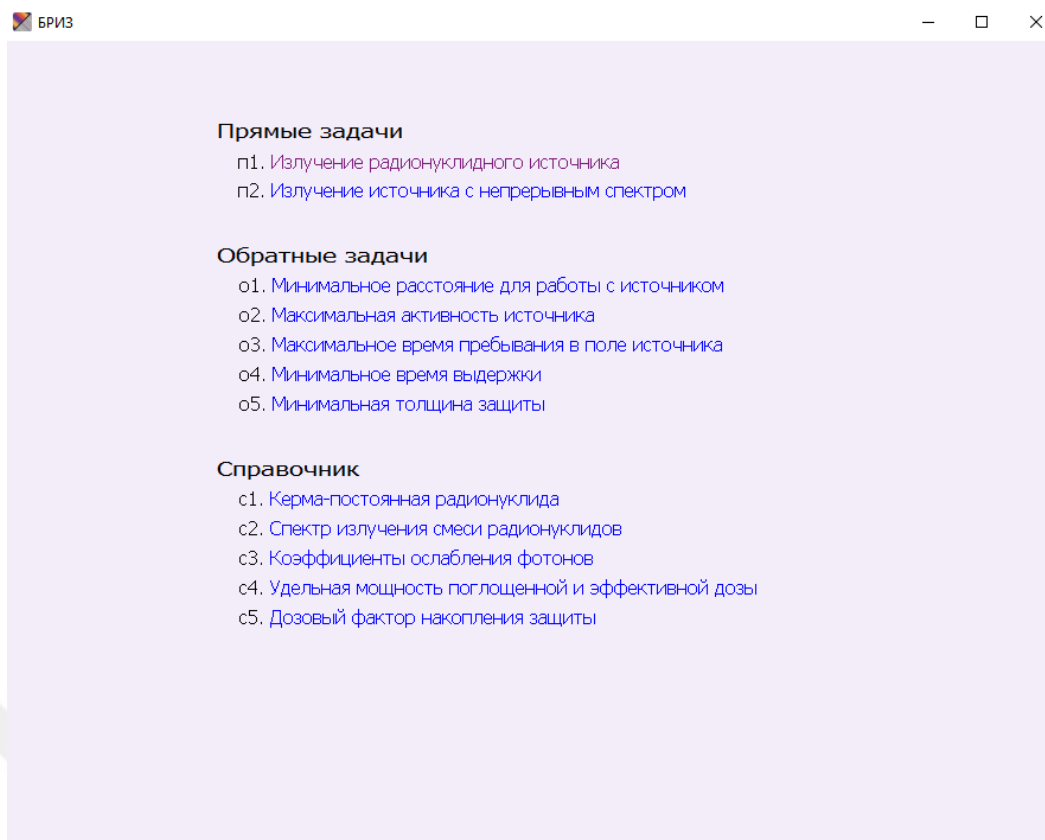


Рис.2.1. Вид главного окна программы БРИЗ-3 с перечнем расчетных задач

В прямых задачах рассчитываются дозовые характеристики полей фотонов (поглощенная доза в воздухе и эффективная доза) с учетом рассеянного в защите, с использованием эффективной энергии и источнике излучения от источников различных геометрических форм и размеров, имеющих разное энергетическое распределение испускаемых фотонов [5]:

п1 – спектры излучения радионуклидов;

п2 – непрерывные спектры фотонов в 36-групповом представлении по энергии.

Чтобы решить проблемы с радионуклидным источником, нажимаем на проблему п1 главного окна программы (рис. 2.2).

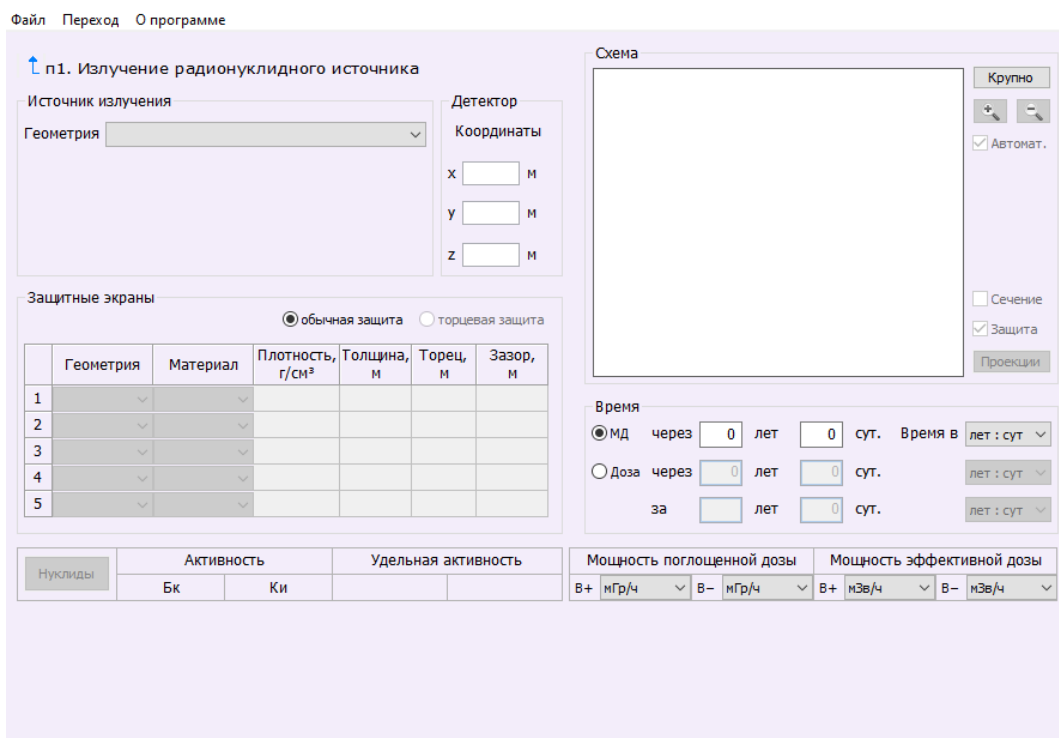


Рис. 2.2. Вид основного окна задачи p1 программы «БРИЗ-3»

Сначала надо выбрать форму геометрии источника. Окно геометрии имеет 14 различных форм, с помощью которых программа может решить проблему.

При реализации геометрического блока программы типы ресурсов по геометрическим параметрам делятся на 4 вида: точечные, линейные, плоские и объемные. Точечный источник существует внутри программы, и нет необходимости вводить какие-либо координаты.

Линейные источники могут быть следующими; Отрезок, Прямоугольный контур (рамка) и Кольцевой.

Геометрические характеристики поверхностных источников могут быть; Прямоугольная пластина, Круг, Поверхность прямоугольного параллелепипеда, Поверхность шара, Поверхность цилиндра, Поверхность трубы.

А геометрические характеристики объемных источников могут быть Прямоугольный параллелепипед, Шар, Цилиндр, Труба.

После выбора размера и формы источника на экране введением размеров источника на схеме справа появляется геометрия источника в соответствии с его размерами.

Детектор определяется как точка, которая находится в геометрическом центре источника и имеет координаты (x_D, y_D, z_D) . Координаты положения детектора, оси X , Y и Z записываются в метрах. Если на какой-либо оси нет координата, его нужно записать как 0. Если значение не введено, соответствующая координата считается неопределенной.

Между источником и детектором мы можем выбрать любой материал и любой толщины, который хотим защитить (толщина протектора должна быть меньше расстояния между детектором и источником). Геометрия защиты зависит от геометрии источника. Для разных геометрий источника возможны [5]:

- 1) Цилиндр- цилиндрическая защита, оболочка с одинаковой толщиной стенок, плоский слой;
- 2) Труба- цилиндрическая защита, оболочка (возможно с разной толщиной стенок), плоский слой;
- 3) Шар- сферическая защита, оболочка с одинаковой толщиной стенок, плоский слой;
- 4) Параллелепипед- оболочка с одинаковой толщиной стенок, плоский слой;
- 5) Точка – цилиндрическая защита, плоский слой;
- 6) Остальные – только плоский слой.

Энергетические характеристики фотонного излучения, испускаемого источником, зависят от решаемой задачи. Для источников радионуклидов в задаче это будет дискретный спектр фотонов, испускаемых радионуклидами.

Во-первых, мы должны нажать кнопку «Нуклиды» на общем экране. И на экране появляется 202 радионуклида (Рис.2.3).

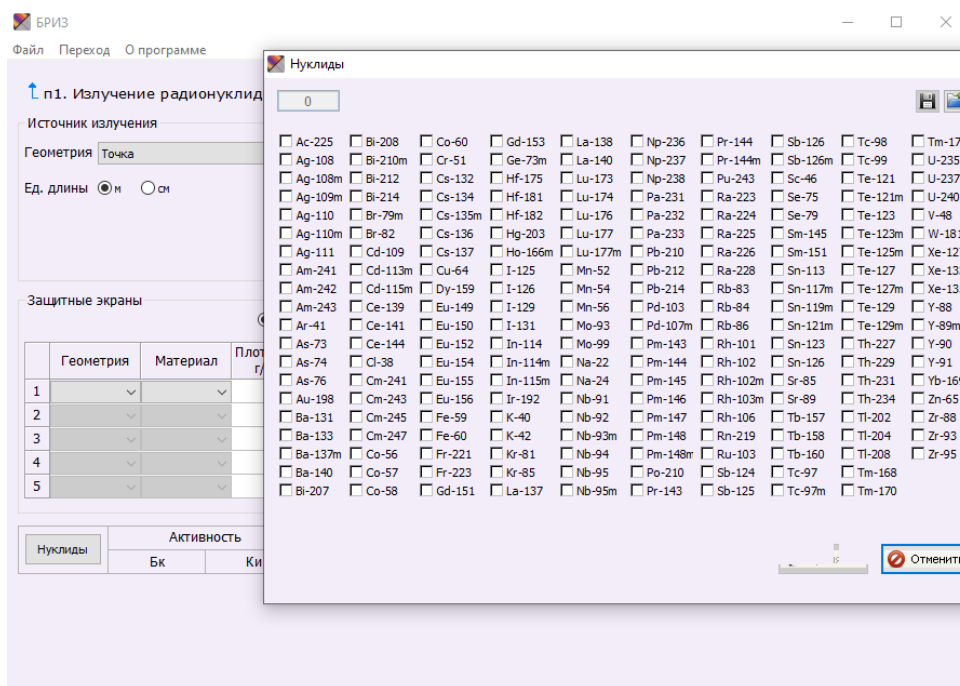


Рис.2.3. Диалоговое окно «Нуклиды»

Мы можем выбрать в одном расчете число радионуклидов не более 25. После завершения набора радионуклидов нажимаем кнопку "Принять" и заходим в главное окно программы, где появляется таблица с выбранными радионуклидами.

В таблицу радионуклидов необходимо ввести активность для каждого нуклида в беккерелях (*Бк*) или кюри (*Ku*).

Расчет задачи начинается с нажатия кнопки "Расчитать". И появляется таблица результатов.

Блок результатов расчета выдает мощность поглощенной и эффективную дозу с учетом (*B+*) и без учета (*B-*) рассеянного излучения в точке расположения детектора. Программа БРИЗ может отображать единицу мощность поглощенной дозы многими способами. Например, мГр/ч, мкГр/с, рад/с.и.т.д

При решении задач с источником с непрерывным спектром излучаемых фотонов в главном окне программы (рис. 2.1) нажмите на задачу п2, после чего появится главное окно этой задачи.

Разница в окнах задач п1) и п2) заключается в изменении блока «нуклеидов» в задачах с радионуклидным источником на блок «фотонного спектра» для источника с непрерывным фотонным спектром. Таким образом, при определении геометрии источника, размеров, координат детектора, выборе и организации защита процедуры одинаковы в обеих задачах.

Вид интерфейса для ввода непрерывного спектра показан на рисунке 2.4.

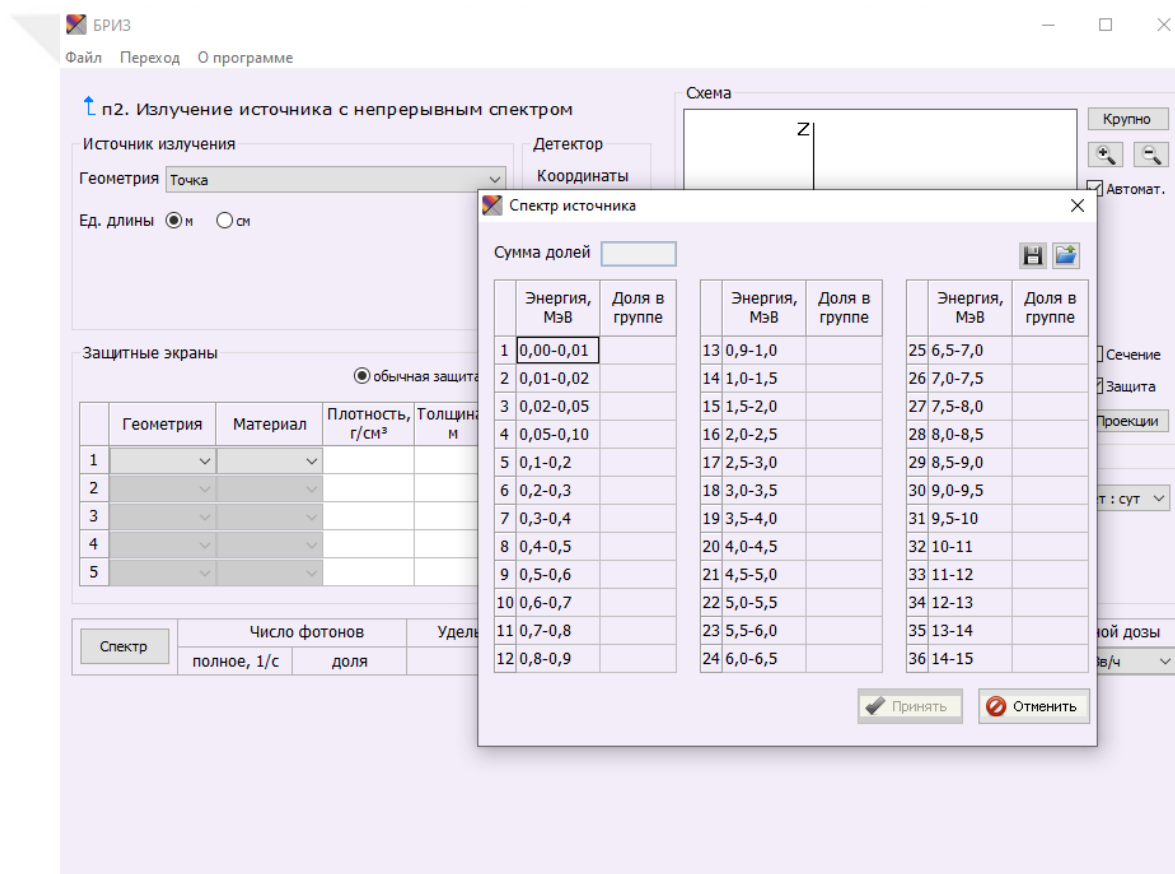


Рис. 2.4 Вид интерфейса для ввода непрерывного спектра

Групповой спектр состоит не более чем из 36 групп. Раздел исправлен и не может быть изменен пользователем. Эта часть не может быть применена к рентгеновскому спектру с максимальной энергией менее 300 кэВ, так как в этом случае количество групп в спектре очень невелико. Для того чтобы иметь

возможность провести расчеты с более мелким разбиением непрерывный спектр представлялся как линейчатый спектр фиктивного радионуклида с числом линий равным числу групп. Этот спектр записывался в файл любого из радионуклидов комплекса БРИЗ и такой метод называется нестандартным использованием программного комплекса БРИЗ.

2.2. Расчеты кратностей ослабления по спектрам и с использованием эффективной энергии.

Графики спектров тормозного излучения для энергий 1, 5, 10 и 15 МэВ, показаны на рисунке 2.5-2.8. Данные спектры были предоставлены сотрудником НИЯУ МИФИ Смирновым В.В.

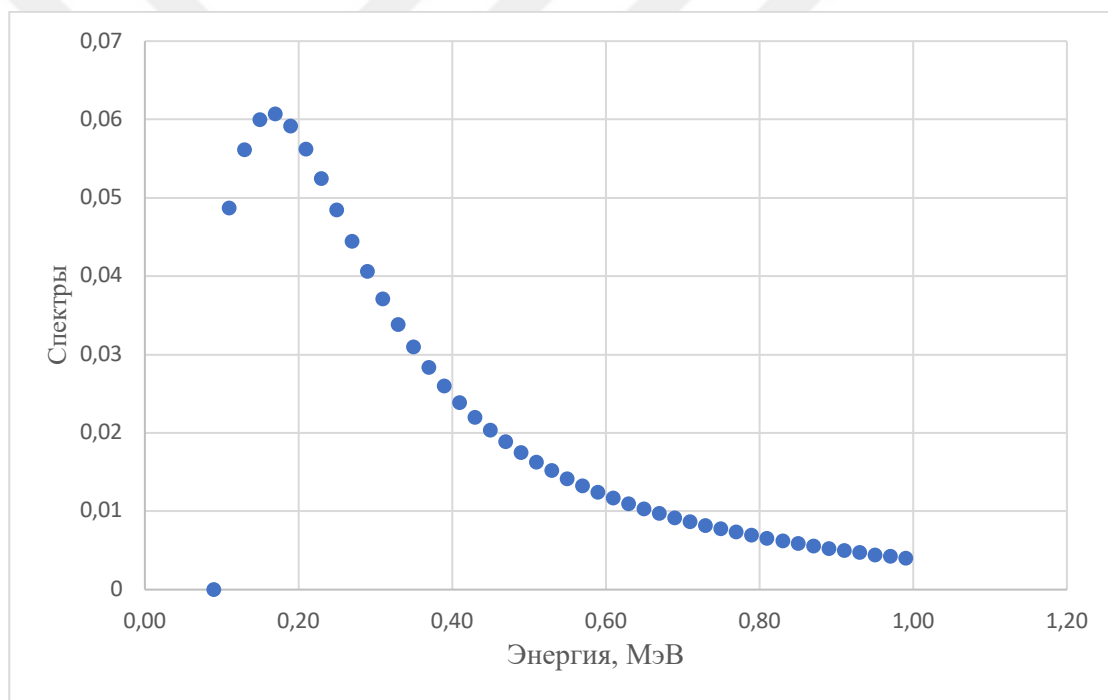


Рис.2.5. Спектр тормозного излучения для энергий 1 МэВ

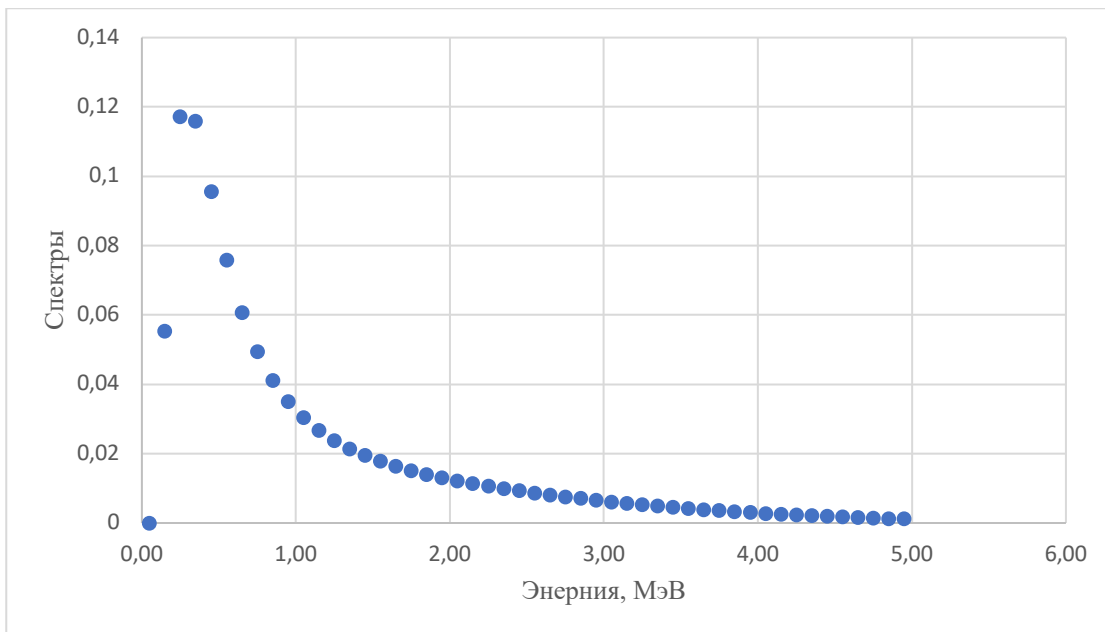


Рис.2.6. Спектр тормозного излучения для энергий 5 МэВ

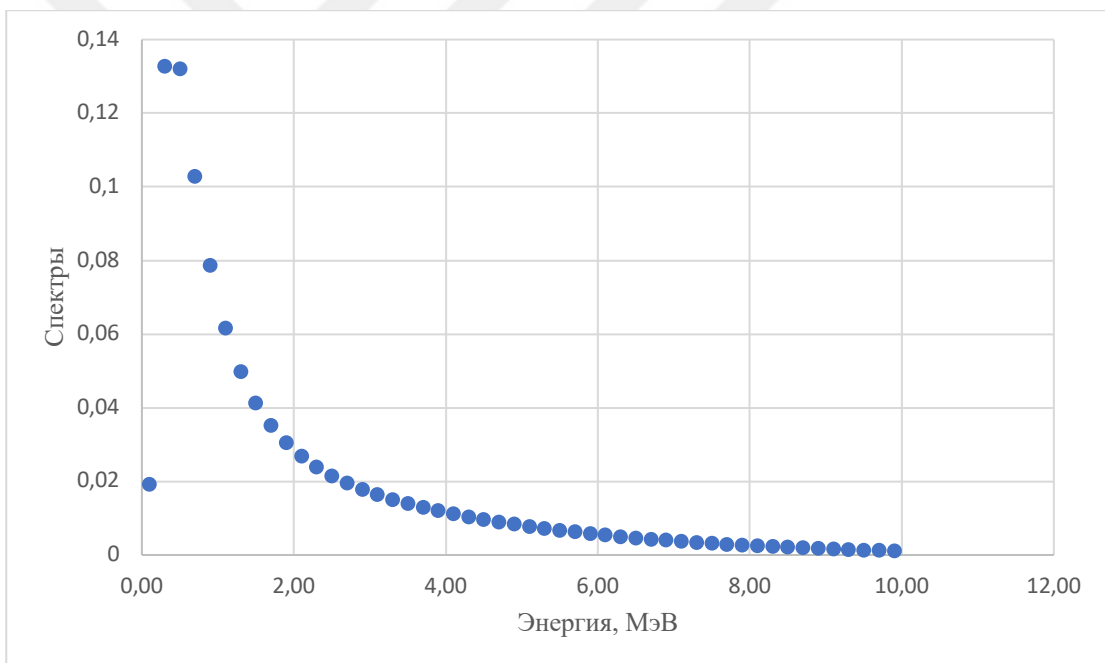


Рис.2.7. Спектр тормозного излучения для энергий 10 МэВ

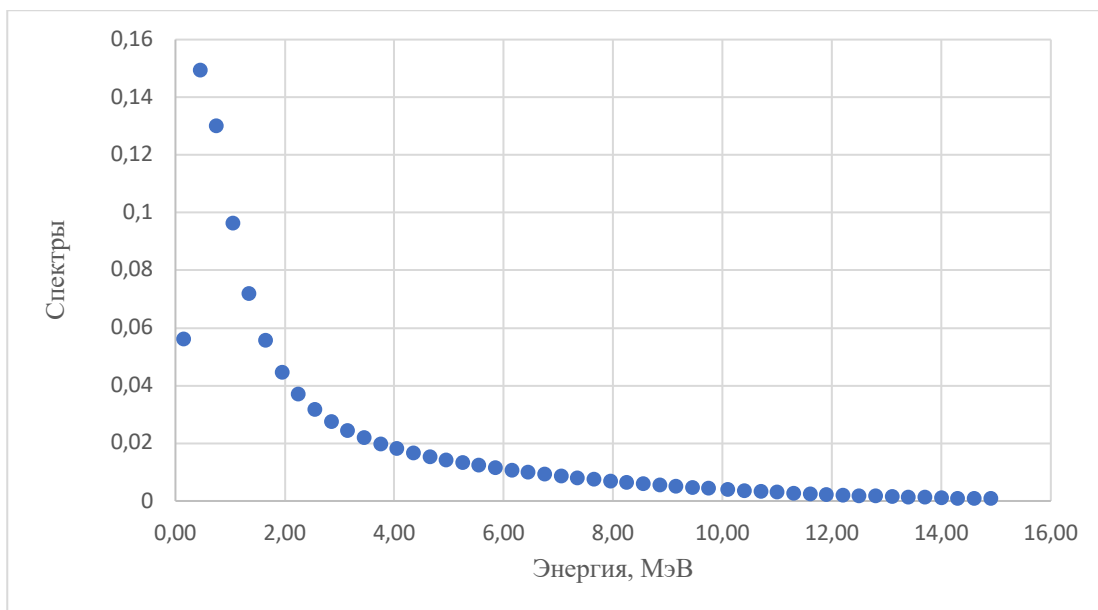


Рис.2.8. Спектр тормозного излучения для энергий 15 МэВ

Расчеты проводились как для эффективной энергии, так и для реального спектра с использованием нестандартной методики БРИЗ. Применение этой методики позволило не проводить переразбиение имеющихся спектров к разбиению БРИЗ.

Формулы (17, 18, 19 и 20) дали нам связь между Эффективная энергия тормозного излучения ($E_{эфф}$) и энергии электронов (E_0).

Заменим данные на эти формулы для максимальная энергия ускорителя 1 МэВ, 5 МэВ ,10 МэВ и 15 МэВ.

Для 1 МэВ $E_{эфф}=0,667$ МэВ,

Для 5 МэВ $E_{эфф}=2,5$ МэВ,

Для 10 МэВ $E_{эфф}=5$ МэВ,

Для 15 МэВ $E_{эфф}=5$ МэВ.

В следующей таблице (Таб.2.1) показано, что какие радионуклиды заменяюткакую эффективную или реальный спектр ускорителя.

Таблица 2.1 спектры ускорители, использованные в расчетах

	Энергия, МэВ	Радионуклиды
1	1 МэВ	Ar-41
2	5 МэВ	As-73
3	10 МэВ	As-74
4	15 МэВ	As-76
5	0,667 МэВ($E_{эфф}$)	Au-198
6	2,5 МэВ($E_{эфф}$)	Ba-131
7	5 МэВ ($E_{эфф}$)	Ba-133

На рисунках 2.9 приведены результаты расчета мощности дозы без защиты бетона для 0,667 МэВ на расстоянии 5 м от источника.

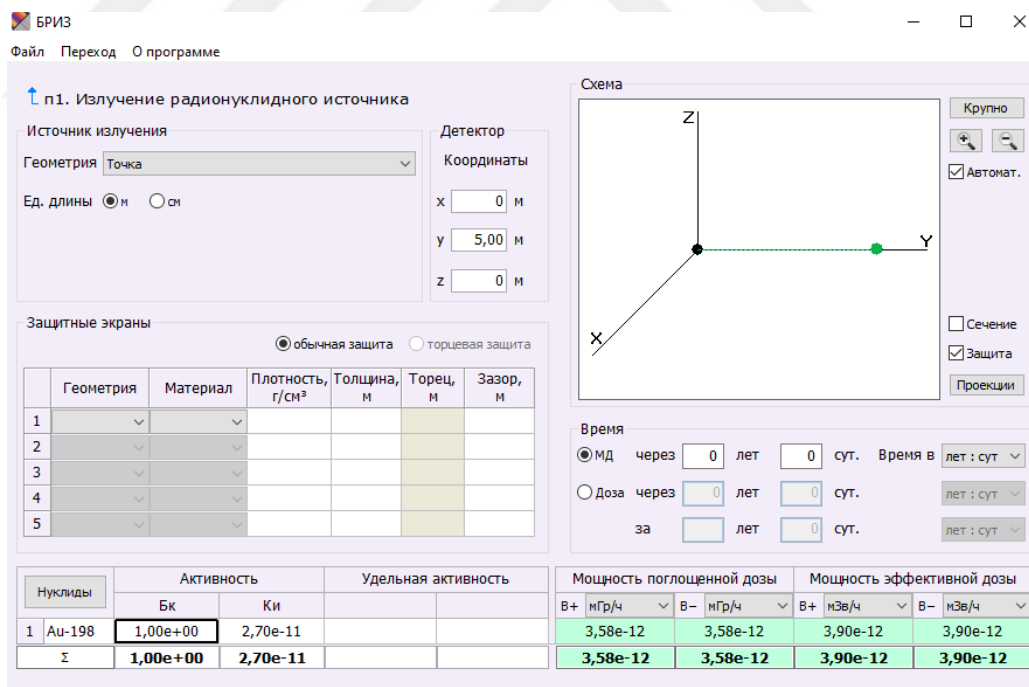


Рис.2.9 Расчета БРИЗ ($E_{эфф} = 0,667$ МэВ) без защиты

На рисунке 2.10 приведены результаты расчета мощности дозы защиты бетона, которая составляет 0,445 м для $E_{эфф} = 0,667$ МэВ на расстоянии 5 м от источника.

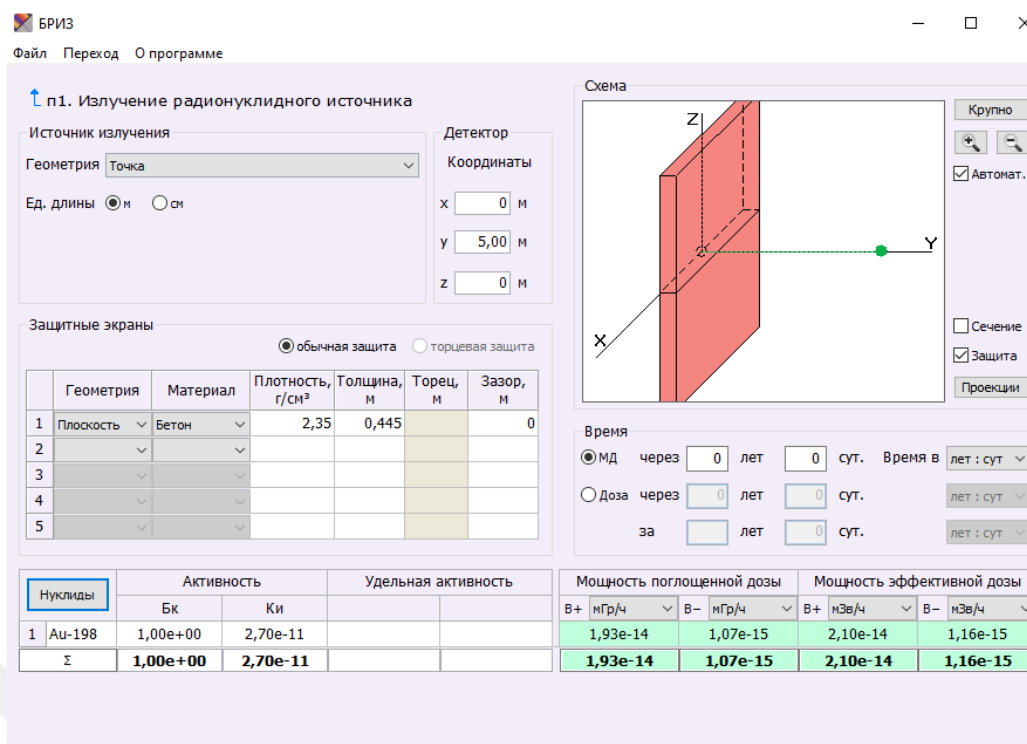


Рис.2.10. Расчета БРИЗ с использованием бетонной защиты для $E_{эфф}=0,667$ МэВ

В таблице 2.2 приведены значения кратности ослабления для эффективной энергии 0,667 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (от 0,445 до 1,230 м), кратность ослабления и толщины защиты были взяты из [7] (эти данные соответствуют таблицам Гусева (Таб. 1.1) [4], максимальная энергия ускорителя для кратности ослабление 1 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (0,445 до 1,230 м). Из таблицы следует, что отношение кратностей ослабления БРИЗ по реальному спектру к табличным значениям из таб (1.1) [4] значительно больше 1, т.е. табличные значения кратности ослабления занижены в несколько раз. Это может объяснено тем, что в БРИЗ проводятся расчеты для барьерной геометрии, а табличные значения даны для бесконечной геометрии. Поправка на барьерность при энергиях 0,5-1,0 МэВ дает большой вклад. Отношение кратности ослабления БРИЗ по реальному спектру и по $E_{эфф}$ отличаются не так сильно при толщинах до 1,0 м. Однако при толщинах более 1,0 м отличия значительны. И главное расчет по эффективной энергии занижает толщину защиты.

Таб. 2.2. Результаты кратности ослабления (Из таблицы 1.1[4], $E_{эфф}=0,667$ МэВ,
Реальный спектр 1 МэВ)

Толщина Бетона, м	K_{Γ} из Гусева (Таб. 1.1)	$K_{эфф}$ для $E_{эфф}=0,667$ МэВ	$K_{сп}$ для реального спектра	$K_{сп}/K_{\Gamma}$	$K_{сп}/K_{эфф}$
0,445	1,00E+02	1,85E+02	2,97E+02	2,97	1,60
0,564	5,00E+02	1,11E+03	1,68E+03	3,36	1,51
0,614	1,00E+03	2,37E+03	3,48E+03	3,48	1,47
0,727	5,00E+03	1,41E+04	1,81E+04	3,62	1,29
0,776	1,00E+04	3,11E+04	3,73E+04	3,73	1,20
0,874	5,00E+04	1,52E+05	1,58E+05	3,16	1,04
0,920	1,00E+05	3,20E+05	3,12E+05	3,12	0,98
1,020	5,00E+05	1,67E+06	1,36E+06	2,71	0,81
1,100	1,00E+06	6,34E+06	4,42E+06	4,42	0,70
1,180	5,00E+06	2,39E+07	1,44E+07	2,88	0,60
1,230	1,00E+07	5,49E+07	3,02E+07	3,02	0,55

На следующем графике (Рис. 2.11) показаны состояния кратности ослабления относительно друг друга.

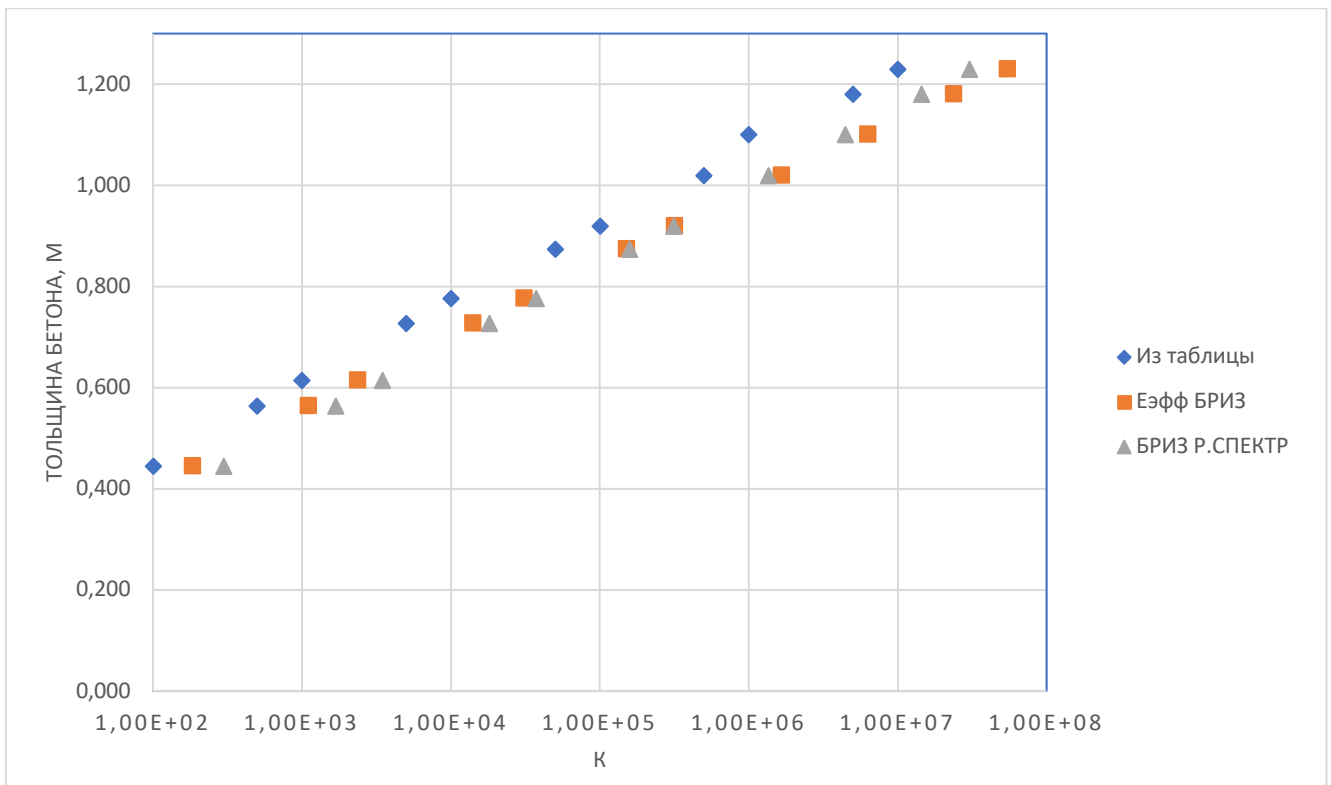


Рис. 2.11. График кратности ослабления (Из таблицы 1.1, $E_{эфф}=0,667$ МэВ, реальный спектр 1 МэВ)

В таблице 2.3 приведены значения кратности ослабления для эффективной энергии 2,5 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (от 0,716 до 2,165 м) кратность ослабления из таблицы Гусева (Таб. 1.1) [4], максимальная энергия ускорителя для кратности ослабление 5 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (от 0,716 до 2,165 м). Из таблицы следует, что отношение кратностей ослабления БРИЗ по реальному спектру к табличным значениям для этого случая несколько меньше, но при больших толщинах табличное значение кратности ослабления завышается, т.е. реальная кратность ослабления ниже. Для отношения кратностей ослабления по БРИЗ тенденция та же, что и для фотонов с энергией граничной энергией 1,0 МэВ.

Таб. 2.3. Результаты кратности ослабления (Из таблицы 1.1[4], $E_{эфф}=2,5$ МэВ,
Реальный спектр 5 МэВ)

Толщина Бетона, м	K_{Γ} из Гусева (Таб. 1.1)	$K_{эфф}$ для $E_{эфф}=2,5$ МэВ	$K_{сп}$ для реального спектра	$K_{сп}/K_{\Gamma}$	$K_{сп}/K_{эфф}$
0,716	1,00E+02	1,46E+02	2,09E+02	2,09	1,43
0,928	5,00E+02	8,49E+02	9,92E+02	1,98	1,17
0,988	1,00E+03	1,42E+03	1,53E+03	1,53	1,08
1,22	5,00E+03	1,03E+04	8,18E+03	1,64	0,79
1,31	1,00E+04	2,26E+04	1,56E+04	1,56	0,69
1,505	5,00E+04	1,26E+05	6,25E+04	1,25	0,50
1,59	1,00E+05	2,67E+05	1,14E+05	1,14	0,43
1,79	5,00E+05	1,59E+06	4,68E+05	0,94	0,30
1,88	1,00E+06	3,54E+06	8,78E+05	0,88	0,25
2,08	5,00E+06	2,14E+07	3,57E+06	0,71	0,17
2,165	1,00E+07	4,61E+07	6,46E+06	0,65	0,14

На следующем графике (Рис. 2.12) показаны состояния кратности ослабления относительно друг друга.

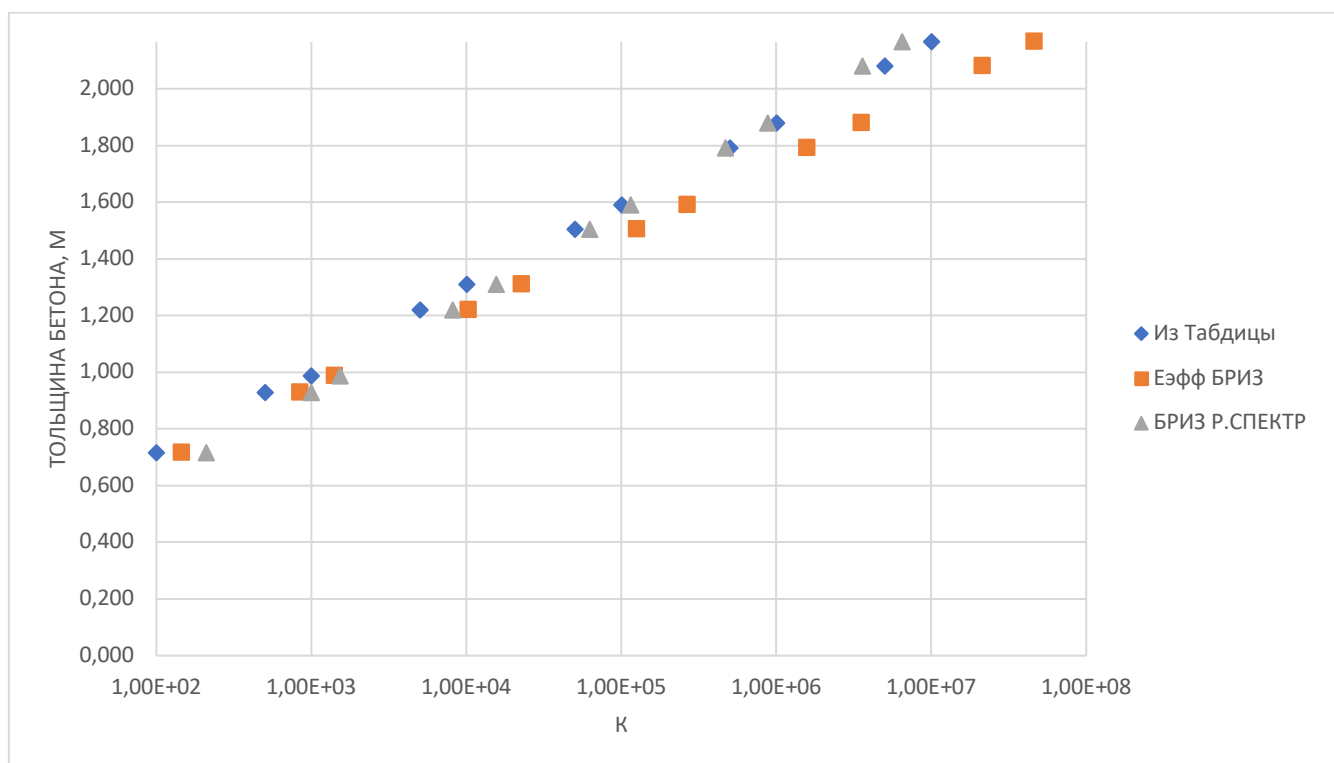


Рис. 2.12. График кратности ослабления (Из таблицы 1.1, $E_{эфф}=2,5$ МэВ, Реальный спектр 5 МэВ)

В таблице 2.4 приведены значения кратности ослабления для эффективной энергии 5 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (от 0,898 до 2,790 м), кратность ослабления из [7] (эти данные соответствуют таблицам Гусева (Таб. 1.1) [4], максимальная энергия ускорителя для кратности ослабление 10 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (от 0,898 до 2,790 м). Из таблицы следует, что отношение кратностей ослабления БРИЗ по реальному спектру к табличным значениям из таб (1.1) достигает 2,17 раза. Однако, для этого случая табличная кратность ослабления практически всегда занижена. Для отношения кратностей ослабления, рассчитанных по БРИЗУ тенденция та же, что и для предыдущих случаев. После толщины бетона 2,79 м табличная кратность ослабления становится завышенной.

Таб. 2.4. Результаты кратности ослабления (Из таблицы 1.1[4], $E_{эфф}=5$ МэВ,
Реальный спектр 10 МэВ)

Толщина Бетона, м	K_{Γ} из Гусева (Таб. 1.1)	$K_{эфф}$ для $E_{эфф}=5$ МэВ	$K_{сн}$ для реального спектра	$K_{сн}/K_{\Gamma}$	$K_{сн}/K_{эфф}$
0,898	1,00E+02	1,14E+02	2,17E+02	2,17	1,90
1,17	5,00E+02	5,91E+02	1,05E+03	2,09	1,77
1,295	1,00E+03	1,27E+03	2,15E+03	2,15	1,69
1,57	5,00E+03	6,97E+03	1,03E+04	2,05	1,47
1,68	1,00E+04	1,39E+04	1,93E+04	1,93	1,38
1,94	5,00E+04	7,16E+04	8,29E+04	1,66	1,16
2,045	1,00E+05	1,39E+05	1,49E+05	1,49	1,07
2,31	5,00E+05	7,57E+05	6,61E+05	1,32	0,87
2,43	1,00E+06	1,64E+06	1,29E+06	1,29	0,79
2,69	5,00E+06	8,69E+06	5,50E+06	1,10	0,63
2,79	1,00E+07	1,66E+07	9,57E+06	0,96	0,58

На следующем графике (Рис. 2.13) показаны состояния кратности ослабления относительно друг друга.

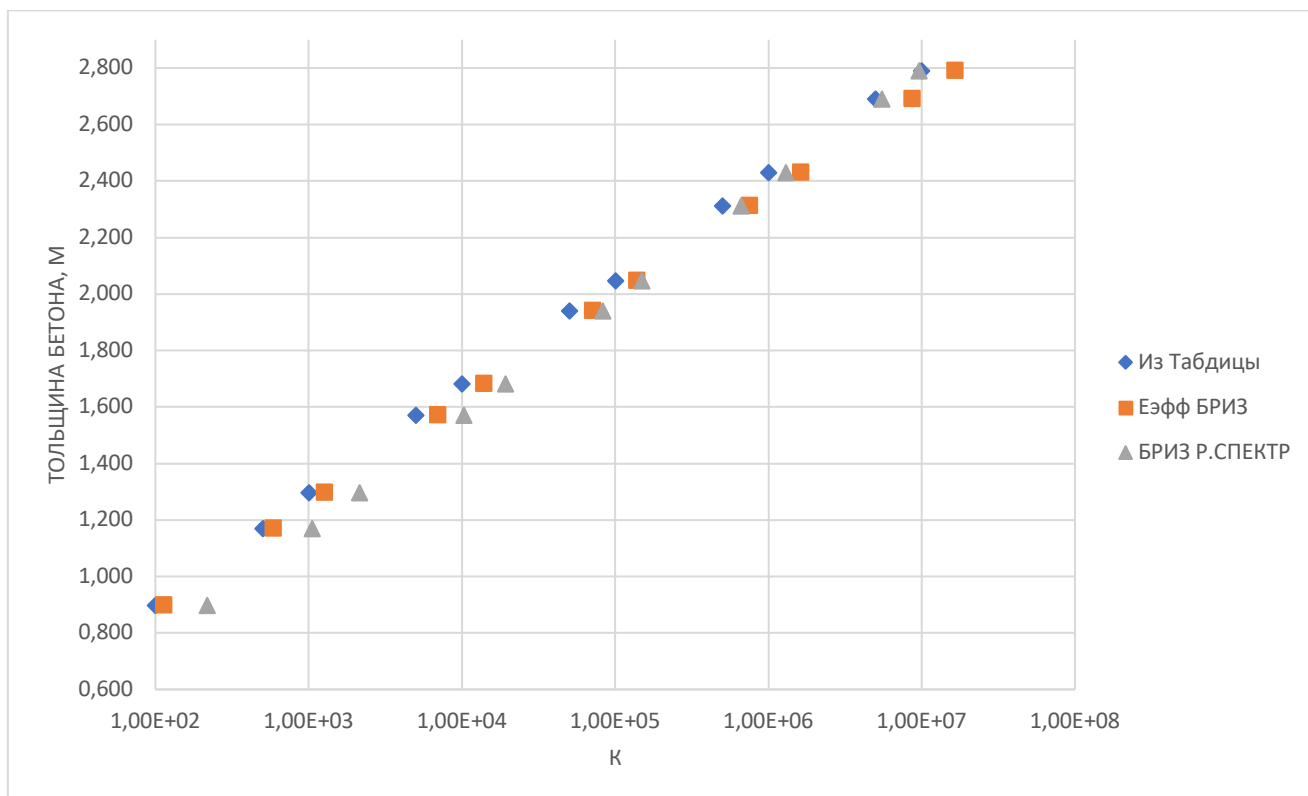


Рис. 2.13. График кратности ослабления (Из таблицы 1.1, $E_{эфф}=5$ МэВ, Реальный спектр 10 МэВ)

В таблице 2.5 приведены значения кратности ослабления для эффективной энергии 5 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (от 0,898 до 2,790 м), кратность ослабления из таблицы Гусева (Таб. 1.1) [4], максимальная энергия ускорителя для кратности ослабление 15 МэВ на расстоянии 5 м от источника толщиной бетона (от 0,898 до 2,79 м). Из таблицы следует, что отношение кратностей ослабления БРИЗ по реальному спектру к табличным значениям из таб (1.1) не больше чем 1,33 раза. Однако вновь наблюдается завышение табличного значения кратности ослабления. Причем это завышение достигает 4 раз при толщине защиты 2,79 м. Для расчетов по БРИЗ тенденция та же, что и для предыдущих случаев расчета.

Таб. 2.5. Результаты кратности ослабления (Из таблицы 1.1[4], $E_{эфф}=5$ МэВ,
Реальный спектр 15 МэВ)

Толщина Бетона, м	K_{Γ} из Гусева (Таб. 1.1)	$K_{эфф}$ для $E_{эфф}=5$ МэВ	$K_{сн}$ для реального спектра	$K_{сн}/K_{\Gamma}$	$K_{сн}/K_{эфф}$
0,898	1,00E+02	1,85E+02	1,33E+02	1,33	1,17
1,17	5,00E+02	1,11E+03	5,66E+02	1,13	0,96
1,295	1,00E+03	2,37E+03	1,10E+03	1,10	0,86
1,57	5,00E+03	1,41E+04	4,63E+03	0,93	0,66
1,68	1,00E+04	3,11E+04	8,23E+03	0,82	0,59
1,94	5,00E+04	1,52E+05	3,20E+04	0,64	0,45
2,045	1,00E+05	3,20E+05	5,52E+04	0,55	0,40
2,31	5,00E+05	1,67E+06	2,19E+05	0,44	0,29
2,43	1,00E+06	6,34E+06	4,08E+05	0,41	0,25
2,69	5,00E+06	2,39E+07	1,57E+06	0,31	0,18
2,79	1,00E+07	5,49E+07	2,63E+06	0,26	0,16

На следующем графике (Рис. 2.14) показаны состояния кратности ослабления относительно друг друга.

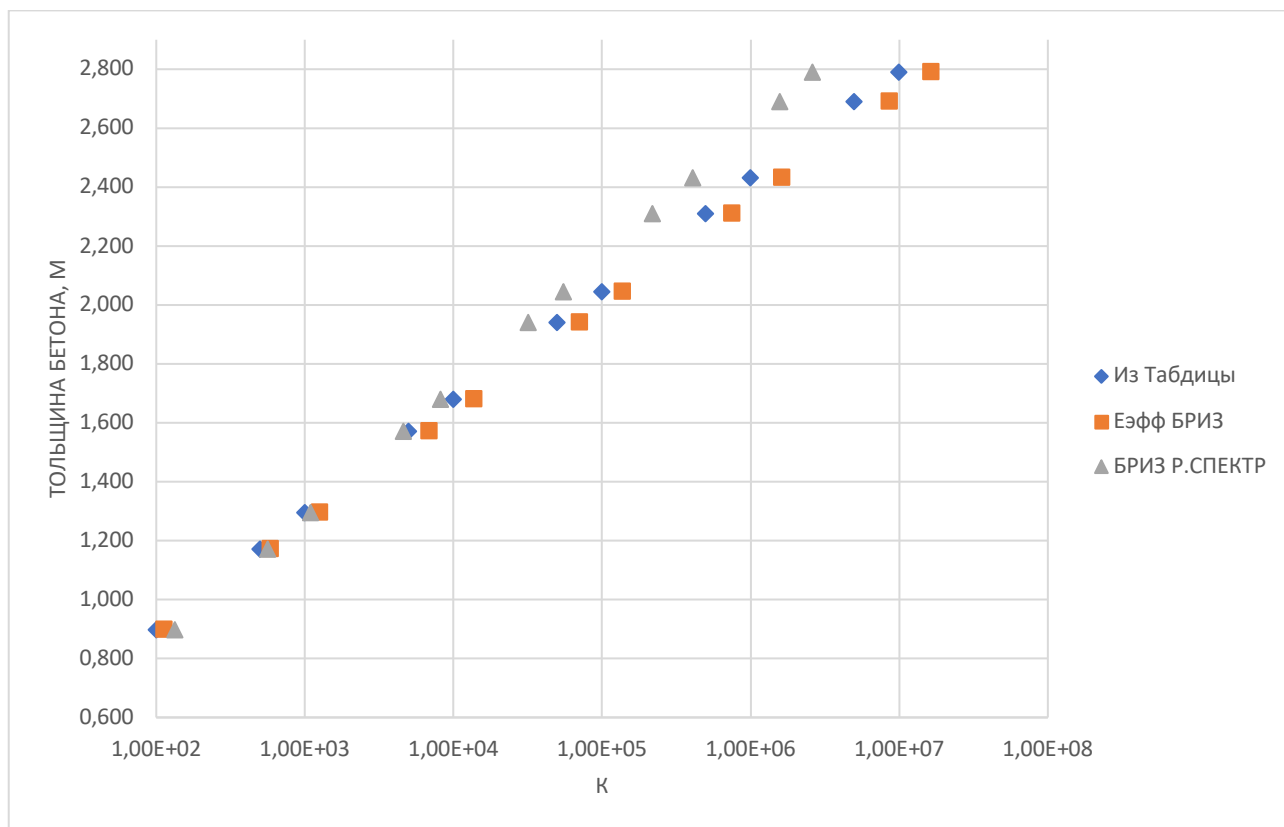


Рис. 2.14. График кратности ослабления (Из таблицы 1.1, $E_{эфф}=5$ МэВ, Реальный спектр 15 МэВ)

Гл. 3. Расчет эффективной энергии

Проведенные выше расчеты показали, что при использовании значений эффективной энергии, рекомендуемых в [7] возникают значительные ошибки в значениях кратности ослабления. Причем при больших значениях кратности ослабления требуемая величина толщины защиты занижается, что приводит к ухудшению радиационной обстановки за защитой. Для более точного определения значений $E_{эфф}$ были проведены расчеты этой величины для различных материалов защиты (бетон, железо, свинец) и спектров тормозного излучения с граничными энергиями 1, 5, 10 и 15 МэВ.

3.1. Методика расчета эффективной энергии

Для расчета эффективной энергии необходимо рассчитать кратность ослабления для моноэнергитических спектров гамма-квантов с различными энергиями для различных толщин защиты и сравнить кривые ослабления для этих энергий с кривой ослабления для реальных спектров тормозного излучения. В качестве эффективной энергии выбирается энергия гамма-квантов кривой ослабления, для которой, наиболее близка к кривой ослабления реального спектра.

3.1.1 Бетон

Кривые ослабления для бетона в относительных единицах приведены на рисунке 3.1–3.4.

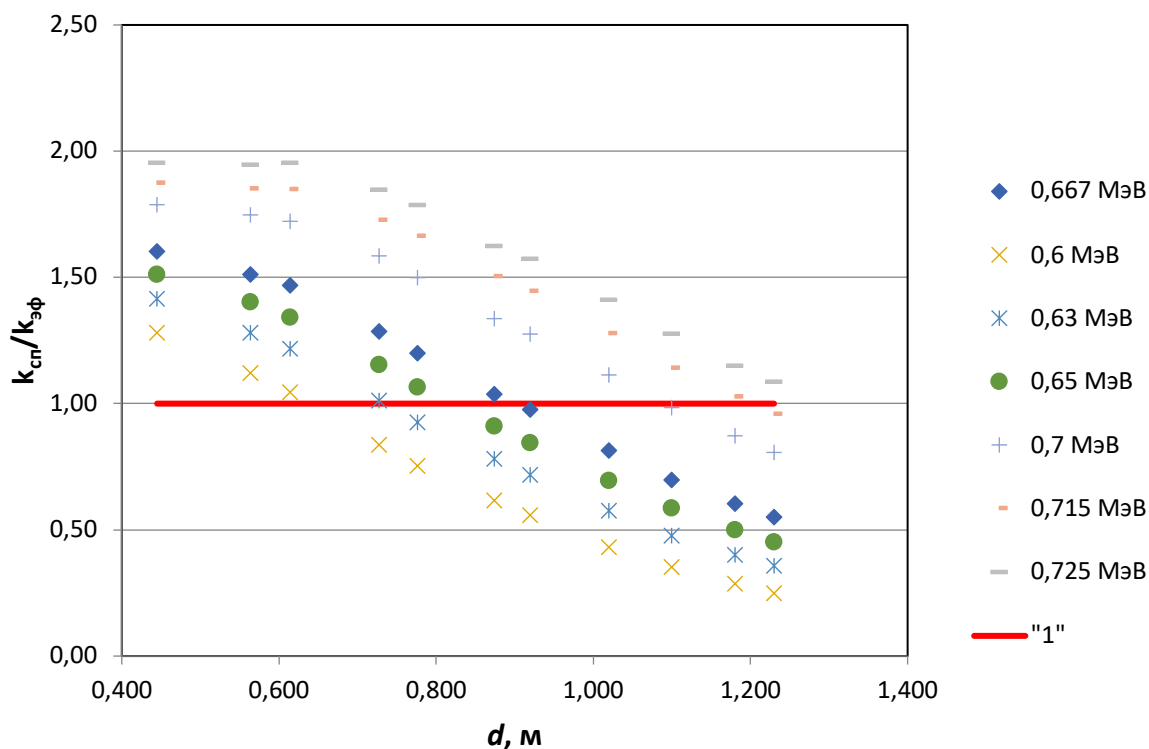


Рис. 3.1. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины бетона для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 1 МэВ

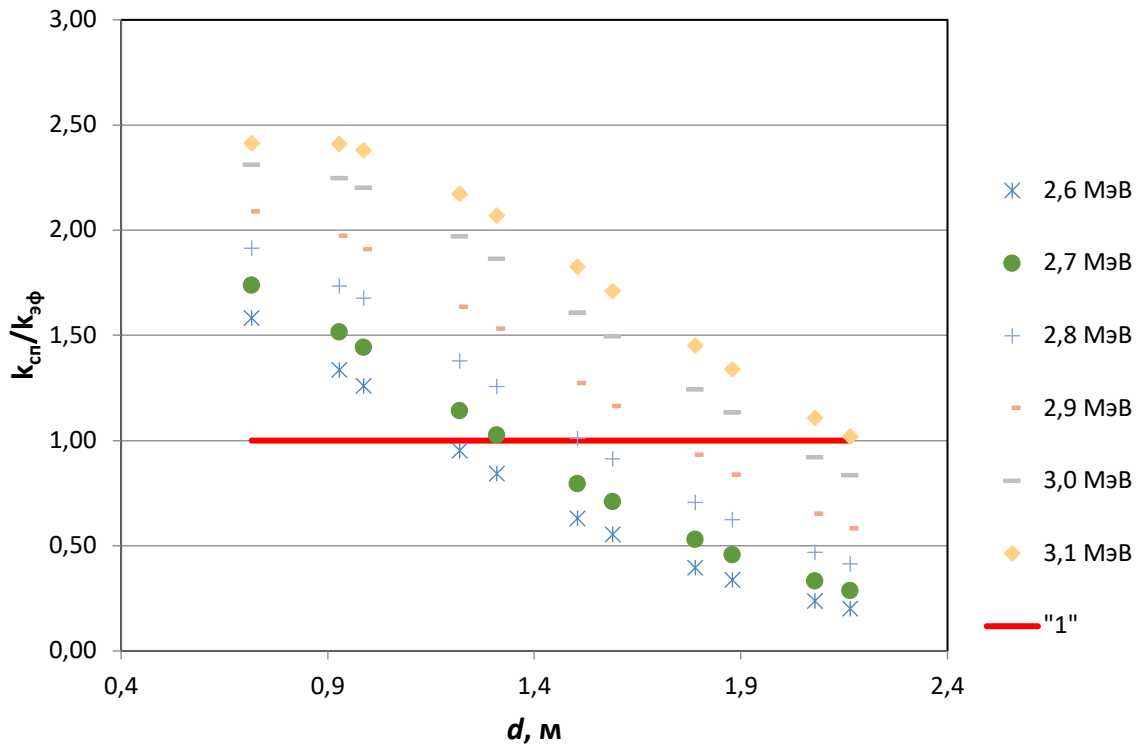


Рис. 3.2. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины бетона для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 5 МэВ

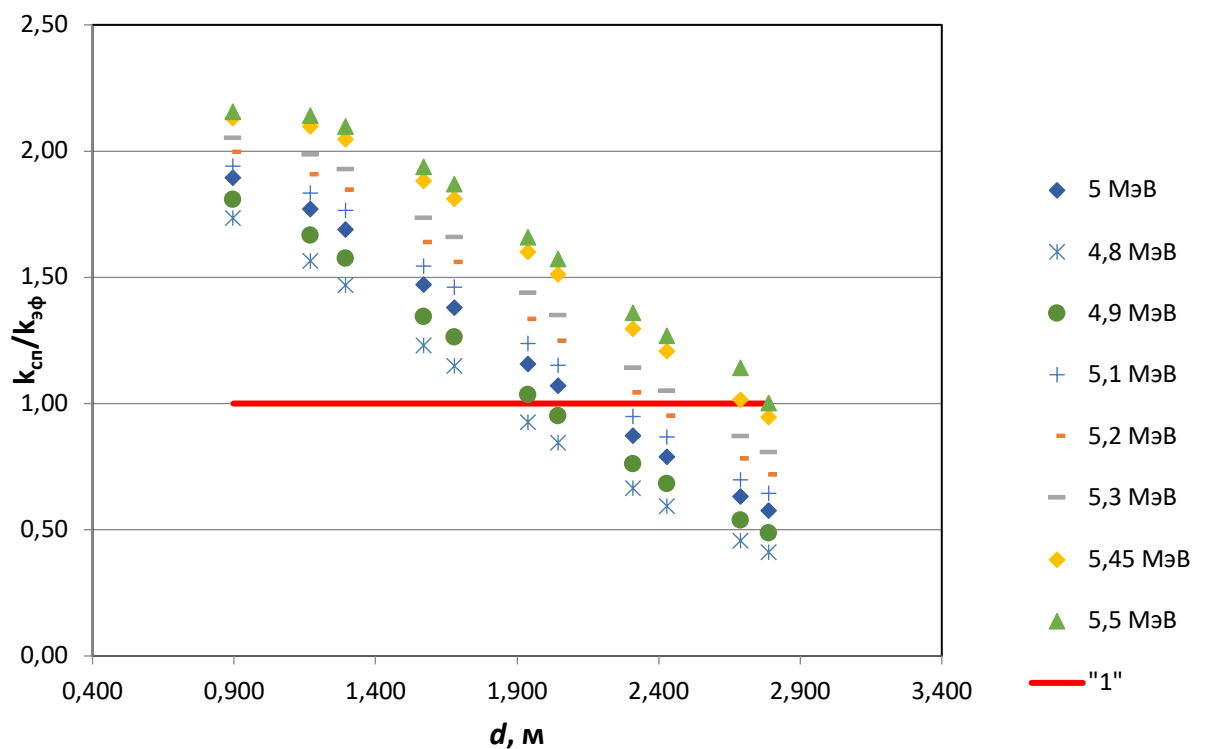


Рис. 3.3. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины бетона для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 10 МэВ

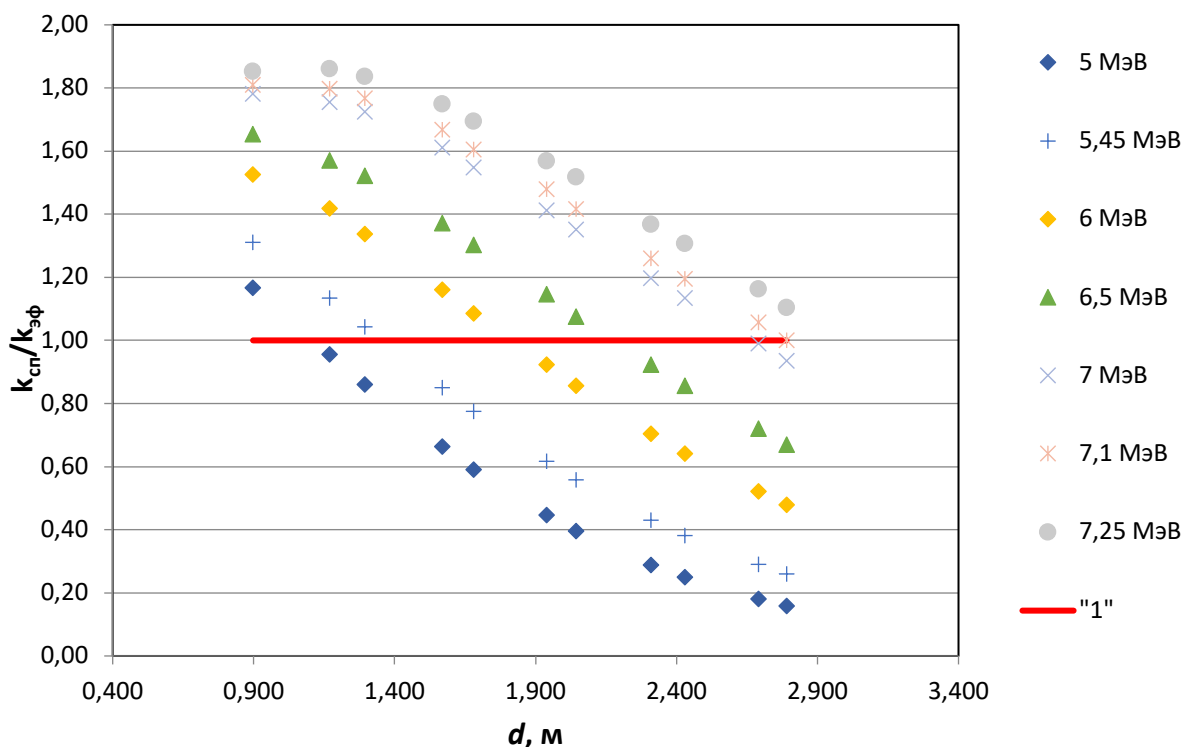


Рис. 3.4. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины бетона для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 15 МэВ

Из рисунков видно, что кривые ослабления для всех энергий практически эквидистантны. Красная горизонтальная линия на всех рисунках соответствует равенству кратностей ослабления для спектра и заданной энергии. Все точки, которые лежат выше этой линии, при расчетах будут завывать толщину защиты, а те точки, которые лежат ниже занижать. Однако из рисунков так же следует, что невозможно подобрать такую энергию, при которой кривые ослабления для этой энергии и спектра совпадут. Критерием выбора значения эффективной энергии можно предложить такое значение, при котором отношение кратностей ослабления будет больше 1, т.е. толщина защиты заведомо будет обеспечивать требуемую кратность ослабления. При этом максимальное занижение кратности ослабления не будет превышать 2,5 (для граничной энергии 5 МэВ и реальной кратности ослабления около 200).

Для удобства расчета эффективной энергии была построена зависимость $E_{эфф}$ от E_0 . Эта зависимость представлена на рисунке 3.5.

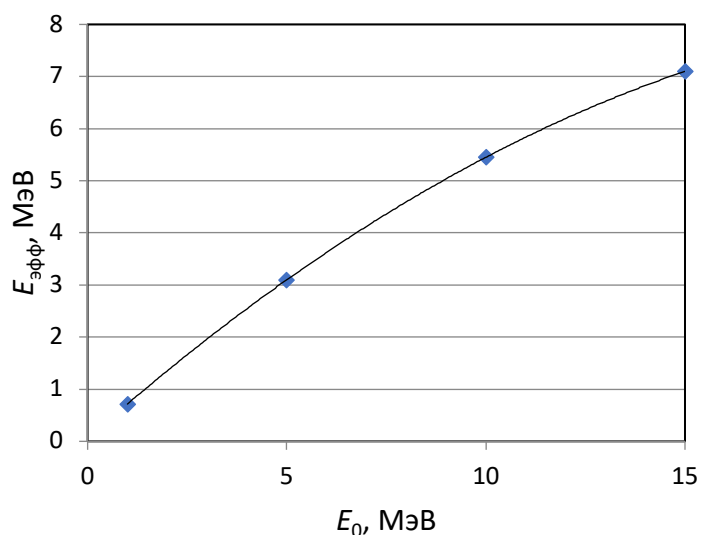


Рис. 3.5. График зависимости $E_{эфф}$ от E_0 .

Ниже приводится аппроксимационная зависимость $E_{эфф}$ от E_0 .

$$E_{эфф} = -0,01401E_0^2 + 0,68025E_0 + 0,04884$$

3.1.2 Железо и свинец

Аналогичные расчеты были проведены для железа и свинца. Рисунки приведены в приложении. Вид зависимостей аналогичен рисункам 3.1–3.4. Однако зависимость $E_{эфф}$ от E_0 (рисунки 3.6, 3.7) несколько отличается от зависимости для бетона (рисунок 3.5), особенно для свинца.

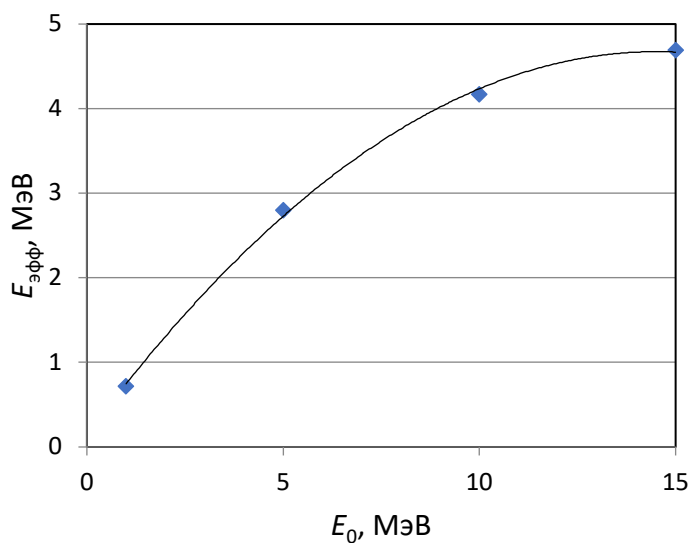


Рис. 3.6. График зависимости $E_{эфф}$ от E_0 для железа

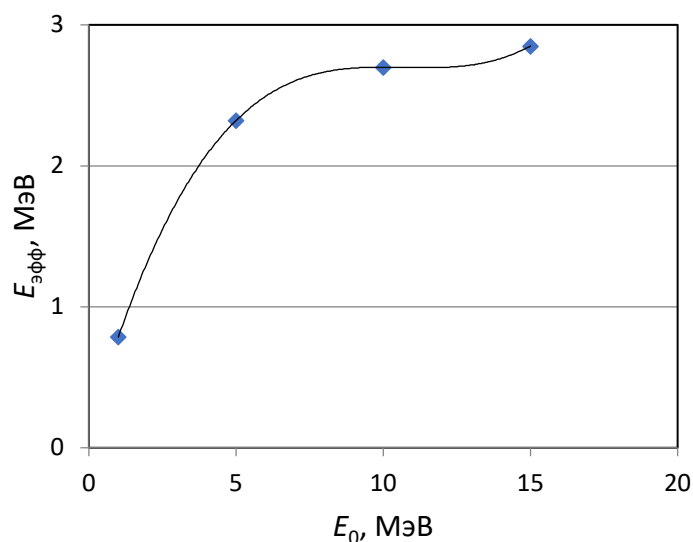


Рис. 3.7. График зависимости $E_{эфф}$ от E_0 для свинца

Соответственно аппроксимационные формулы для железа и свинца приводятся ниже:

$$\text{Железо: } E_{эфф} = -0,0215E_0^2 + 0,6238E_0 + 0,1447$$

$$\text{Свинец: } E_{эфф} = 0,0021E_0^3 - 0,0683E_0^2 + 0,7281E_0 + 0,1231$$

Для железа и свинца занижение кратности ослабления при граничной энергии 2,5 и 1 МэВ достигает величин 2,1 и 3 при реальных кратностях ослабления около 150, соответственно.

3.2. Анализ результатов

Проведенные расчеты показали, что пользоваться понятием эффективная энергия надо крайне осторожно. Простейший способ определения $E_{эфф}$, предложенный в [7] дает большие ошибки, которые могут приводить к занижению толщины защиты. Значения эффективной энергия зависят от граничной энергии спектра и от материала, что видно из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 зависимость эффективной энергии от граничной энергии спектра
гамма-квантов

<i>Материал</i> E_0	<i>Бетон</i>	<i>Железо</i>	<i>Свинец</i>	<i>[7]</i>
<i>1</i>	<i>0,72</i>	<i>0,72</i>	<i>0,79</i>	<i>0,67</i>
<i>5</i>	<i>3,1</i>	<i>2,8</i>	<i>2,3</i>	<i>2,5</i>
<i>10</i>	<i>5,5</i>	<i>4,2</i>	<i>2,7</i>	<i>5</i>
<i>15</i>	<i>7,1</i>	<i>4,7</i>	<i>2,9</i>	<i>5</i>



Заключение

В результате выполненной работы были освоены программный комплекс БРИЗ. С помощью этой программы сравнивались результаты расчетов кратности ослабления (из таблицы Гусева, БРИЗ с эффективной энергией и БРИЗ с реальным спектром источника). Были также рассчитаны значения эффективной энергии для спектров с граничными энергиями 1, 5, 10 и 15 МэВ, для бетона, железа и свинца.

Основные выводы:

1. Отношение кратностей ослабления БРИЗ по реальному спектру к табличным значениям зависят от энергии фотонов, значения эффективной энергии и вида материала защиты.
2. Для спектра фотонов с граничной энергией 1,0 МэВ и рекомендуемой в [7] эффективной энергией 0,67 МэВ табличная кратность ослабления (для бетона) всегда занижена, поэтому рассчитанная толщина защиты будет получена с запасом.
3. Для спектра фотонов с граничной энергией 5,0 МэВ и рекомендуемой в [7] эффективной энергией 2,5 МэВ табличная кратность ослабления (для бетона) завышается при её значении более $5,5 \times 10^5$. Т.е. при таких толщинах рассчитанная толщина защиты будет недостаточной.
4. Для спектра фотонов с граничной энергией 10 МэВ и рекомендуемой в [7] эффективной энергией 5,0 МэВ табличная кратность ослабления (для бетона) почти всегда занижена, поэтому рассчитанная толщина защиты будет получена с запасом. Однако при значении кратности ослабления более 10^7 будет наблюдаться завышение этой величины.
5. Для спектра фотонов с граничной энергией 15,0 МэВ и рекомендуемой в [7] эффективной энергией 5,0 МэВ табличная кратность ослабления (для бетона) завышается при её значении

более $5E+3$. Т.е. при таких толщинах рассчитанная толщина защиты будет недостаточной.

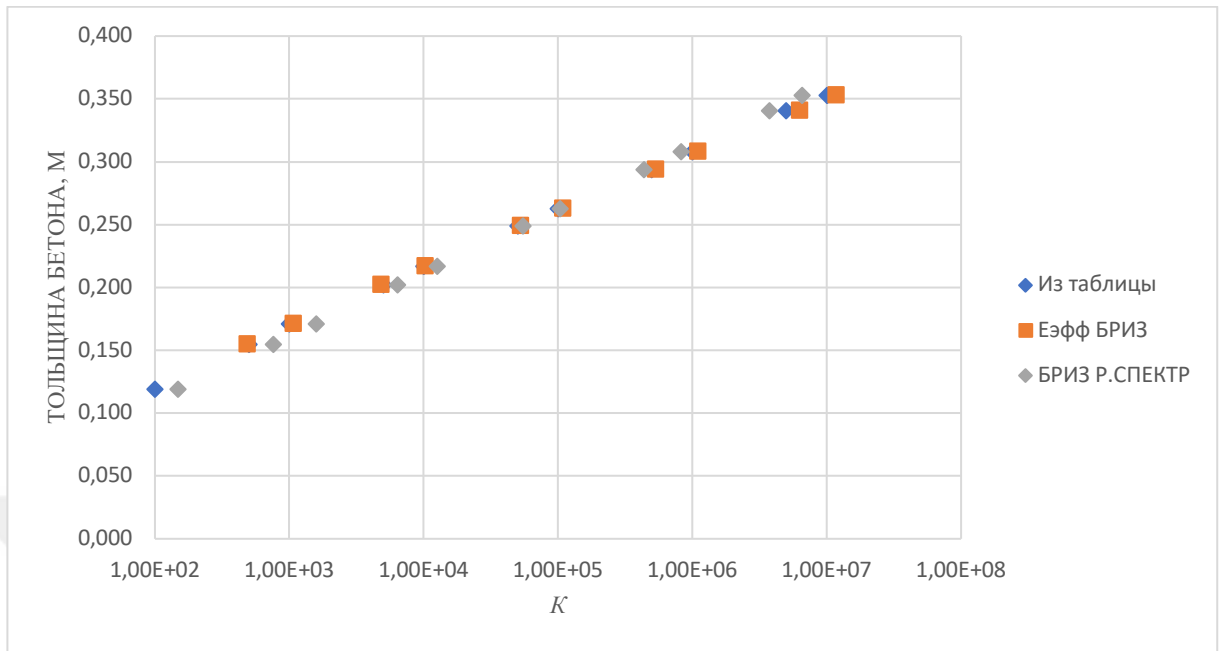
6. Для железа расчет кратности ослабления по значениям эффективной энергии рекомендуемой в [7] дает завышенные значения кратности ослабления для граничной энергии 1,0 и 5,0 МэВ. При более высоких энергиях кратность ослабления занижается, т.е. толщина защиты всегда будет избыточной.
7. Для свинца расчет кратности ослабления по значениям эффективной энергии рекомендуемой в [7] дает завышенные граничной энергии 1,0 МэВ. При более высоких энергиях кратность ослабления занижается, т.е. толщина защиты всегда будет избыточной.
8. Пользоваться понятием эффективной энергии надо очень осторожно и только, если неизвестен спектр гамма-излучения, т.к. возможны ошибки в расчете защиты, приводящие к занижению её толщины.
9. Для более корректного использования эффективной энергии необходимо проводить её расчет по формулам, полученным в данной работе.

Список используемой литературы

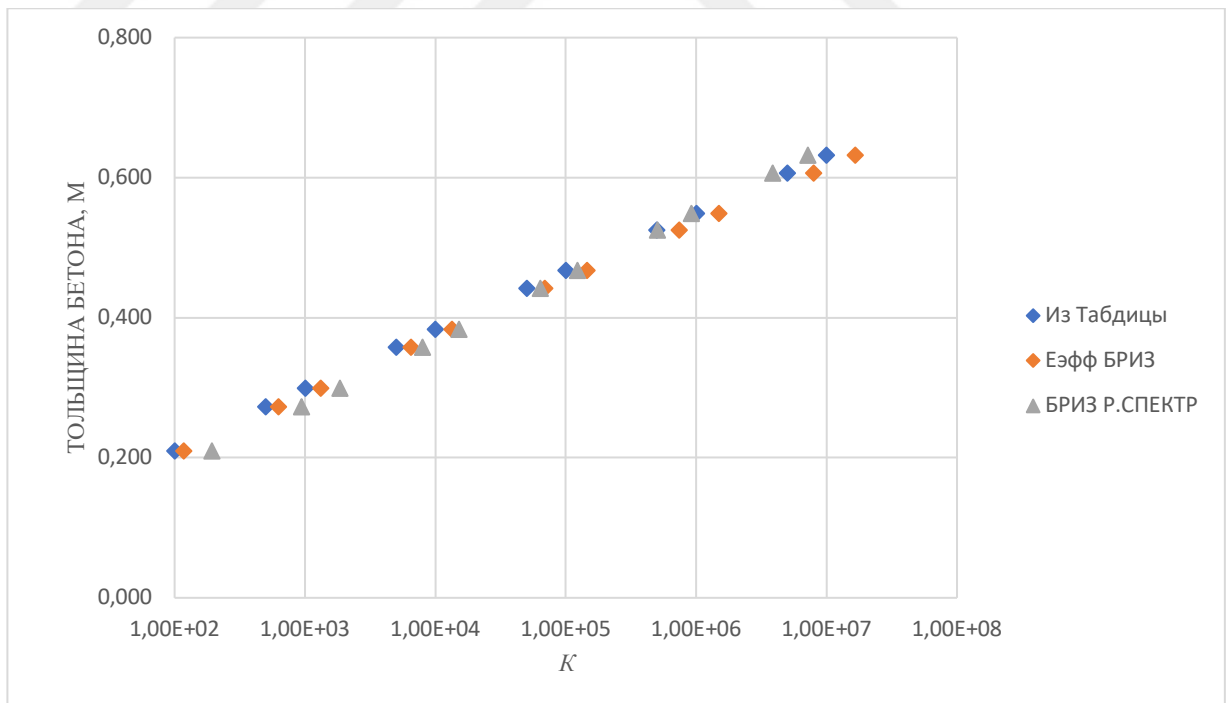
1. Электронный вариант учебного пособия «Рентгенография металлов»/ В.М.Ершов
<https://studfile.net/preview/5056559/>
2. Ядерная Физика / И.Н.Бекман <http://profbeckman.narod.ru/YadFiz.files/L13.pdf>
3. Лекции по радиационной защите : учебное пособие / В.И. Беспалов ; Томский политехнический университет. – 5-е изд., расшир. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 129 с.
4. <http://base.garant.ru/12174247/b89690251be5277812a78962f6302560/>
5. Программный комплекс оперативного расчета характеристик полей фотонного излучения БРИЗ-2 / НИЯУ МИФИ – Москва, 2015.– 41 с.
6. https://studme.org/241385/tehnika/zaschitnye_materialy_fotonnogo_izlucheniya
7. СанПиН 2.6.1.2573-10

Приложение

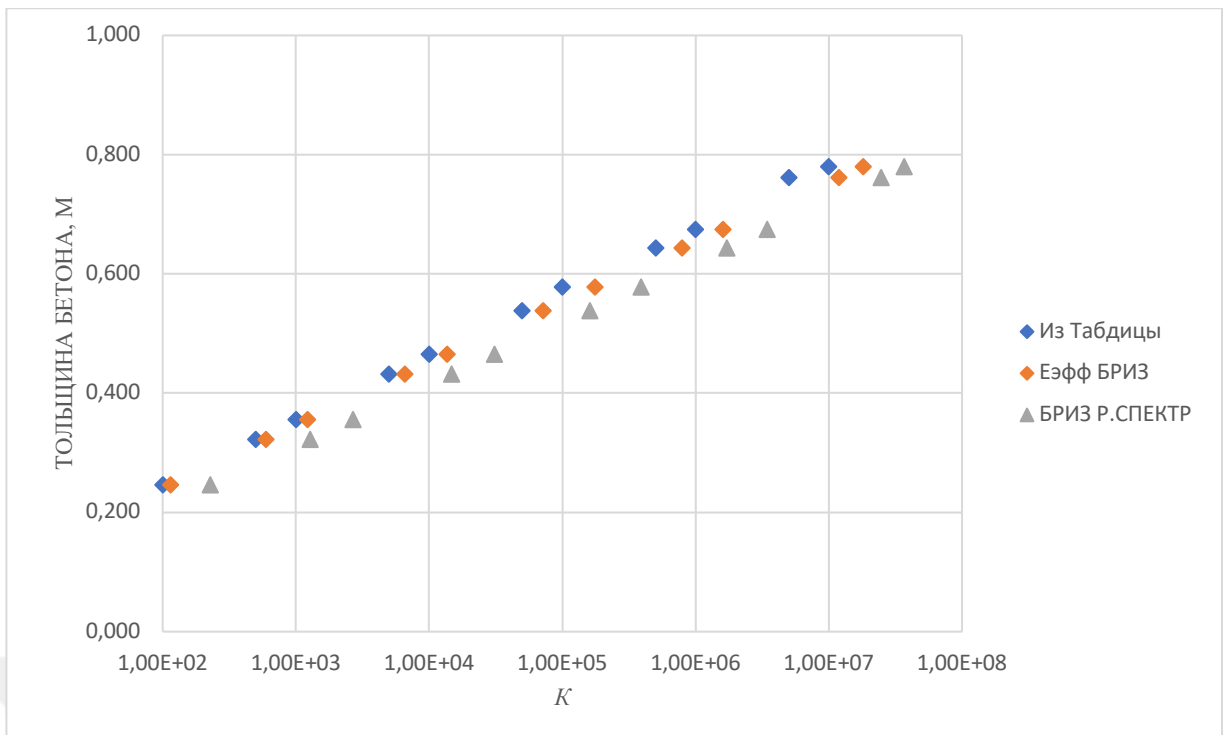
а. Графики для железа



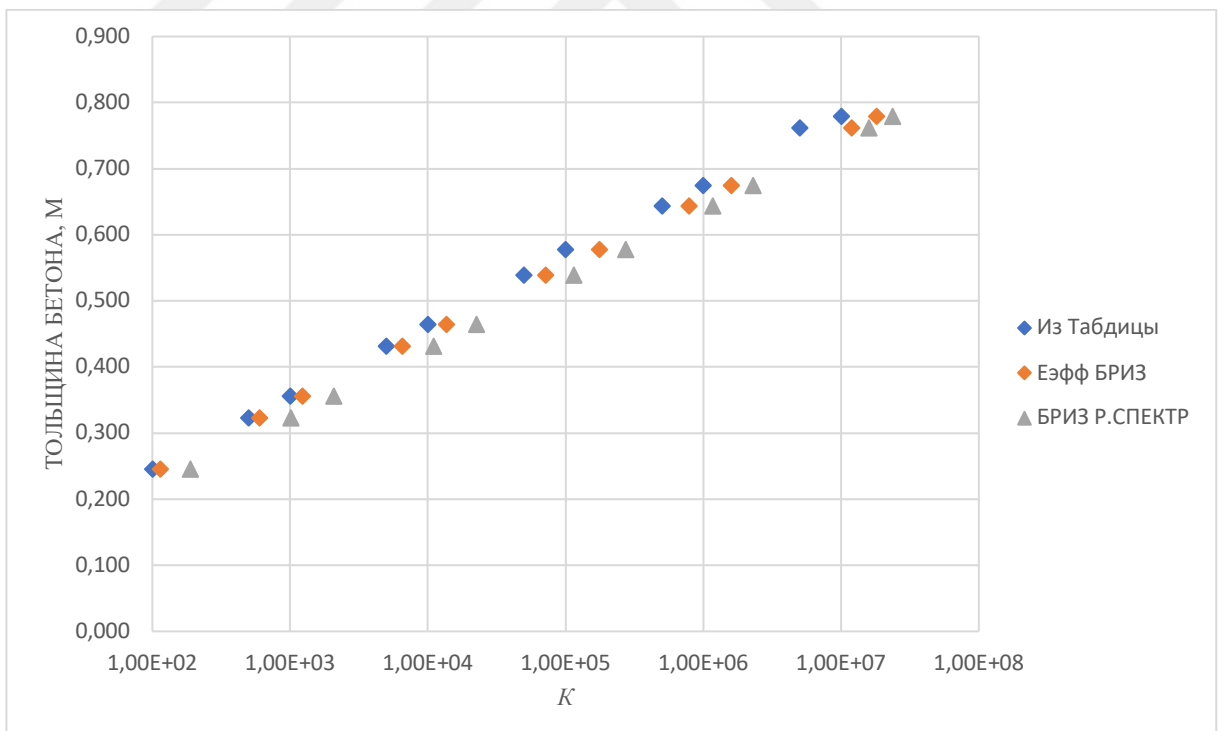
П1. График кратности ослабления для железа (Из таблицы 1.2, $E_{эфф} = 0,667$ МэВ, Реальный спектр 1 МэВ)



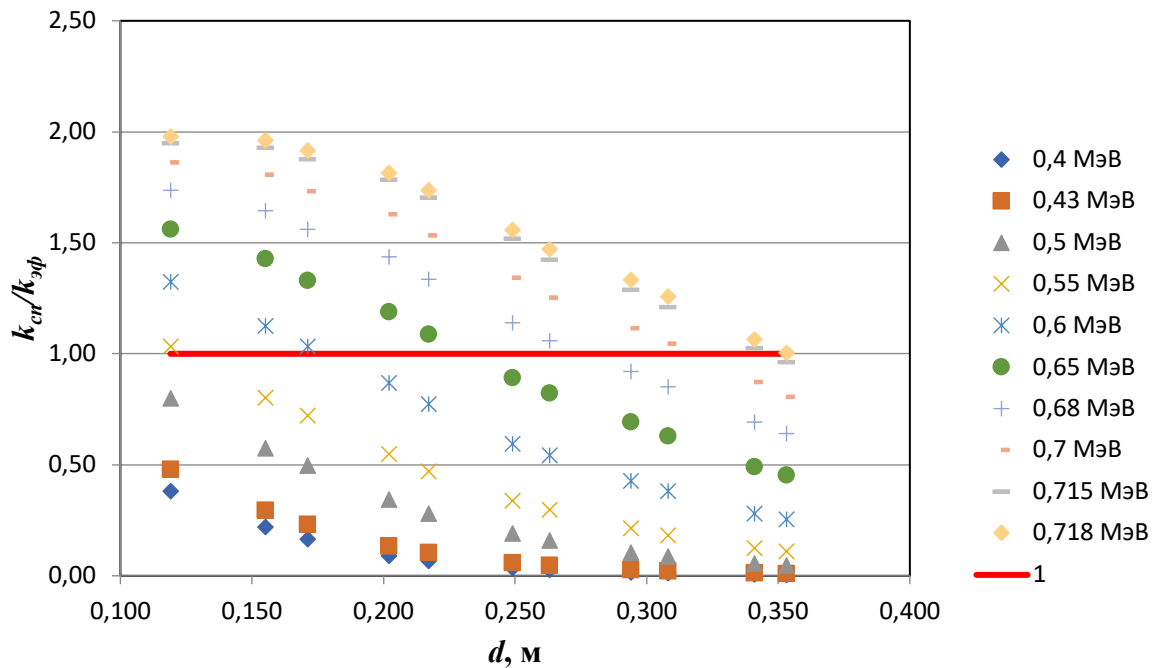
П2. График кратности ослабления для железа (Из таблицы 1.2, $E_{эфф} = 2,5$ МэВ, Реальный спектр 5 МэВ)



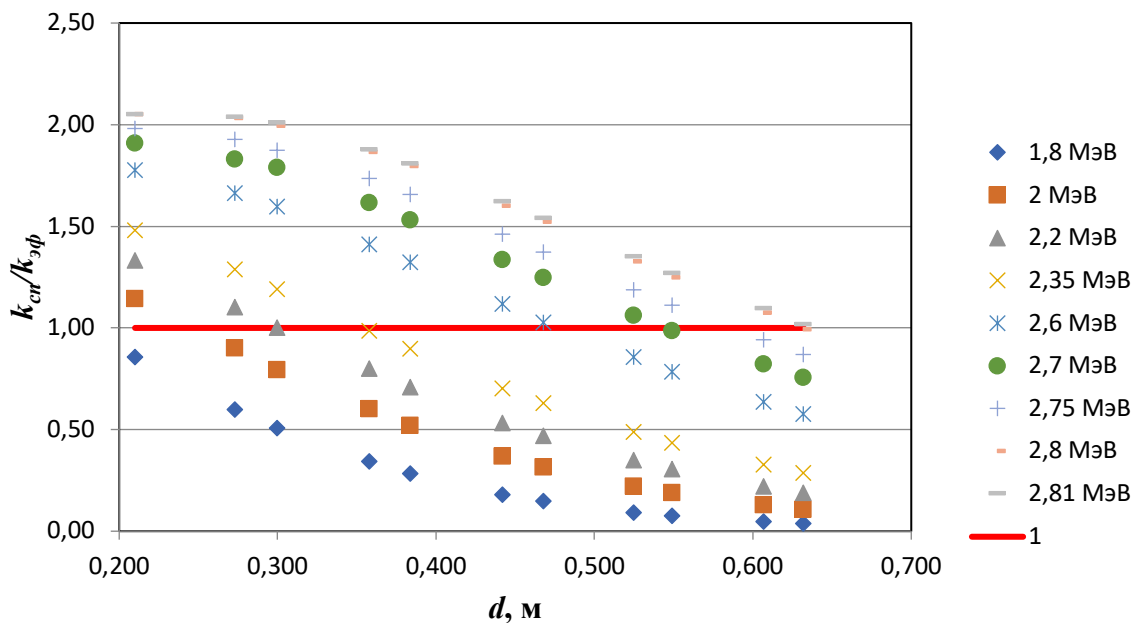
П3. График кратности ослабления для железа (Из таблицы 1.2, $E_{эфф}=5$ МэВ, Реальный спектр 10 МэВ)



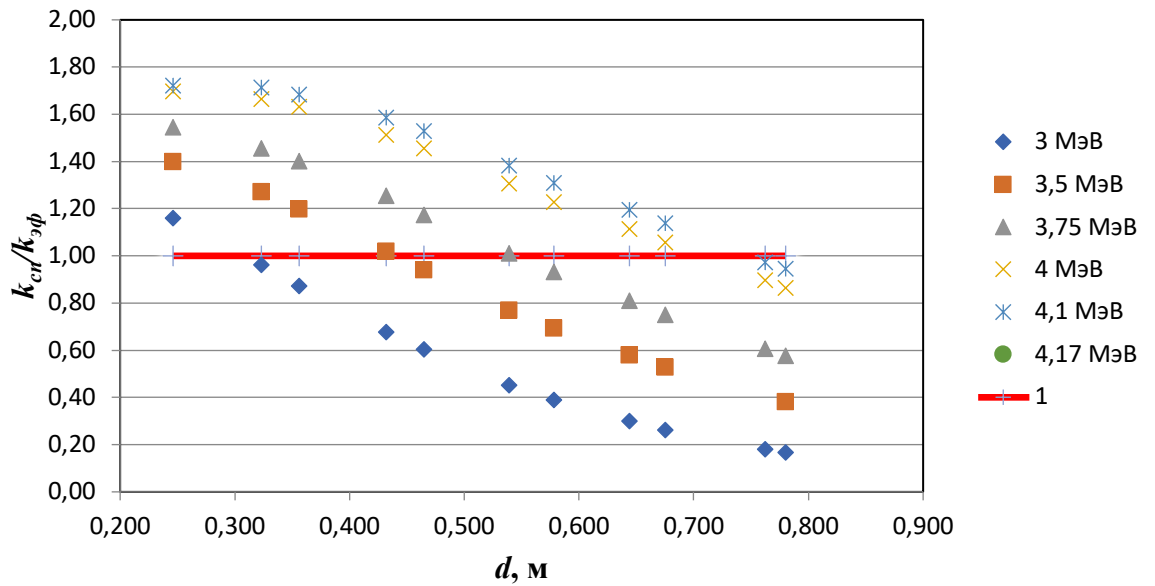
П4. График кратности ослабления для железа (Из таблицы 1.2, $E_{эфф}=5$ МэВ, Реальный спектр 15 МэВ)



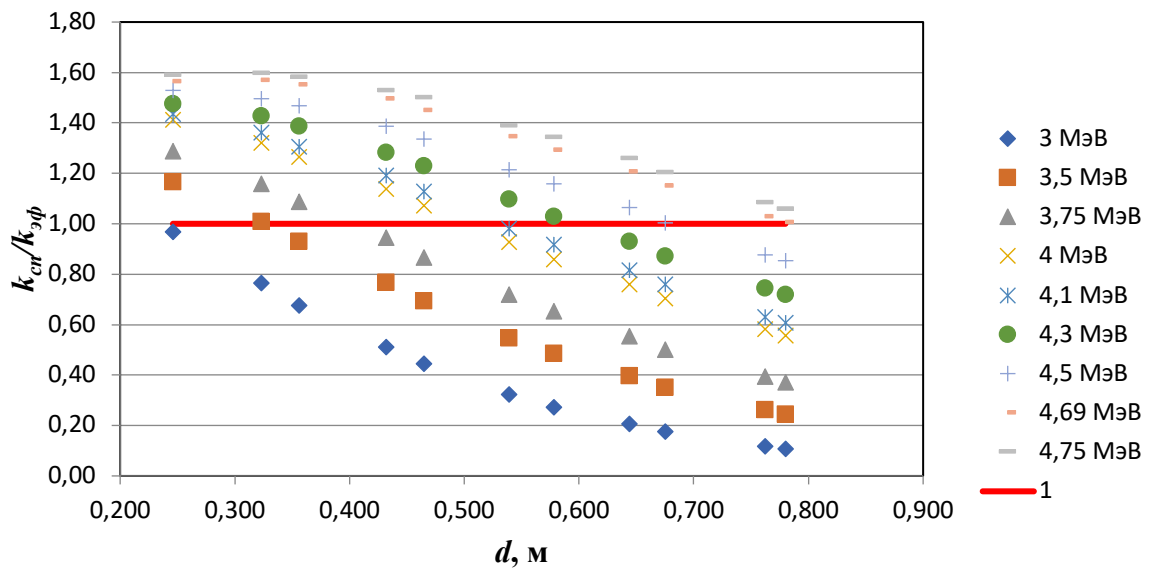
П5. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины железа для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 1 МэВ



П6. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины железа для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 5 МэВ

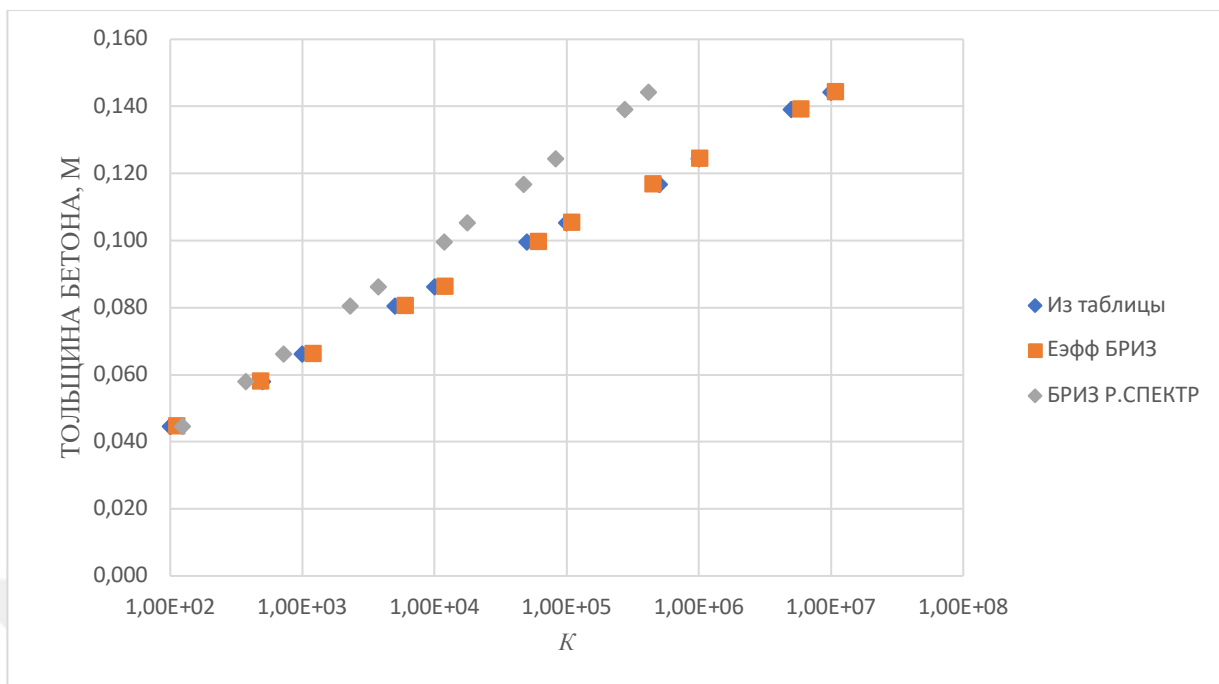


П7. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины железа для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 10 МэВ

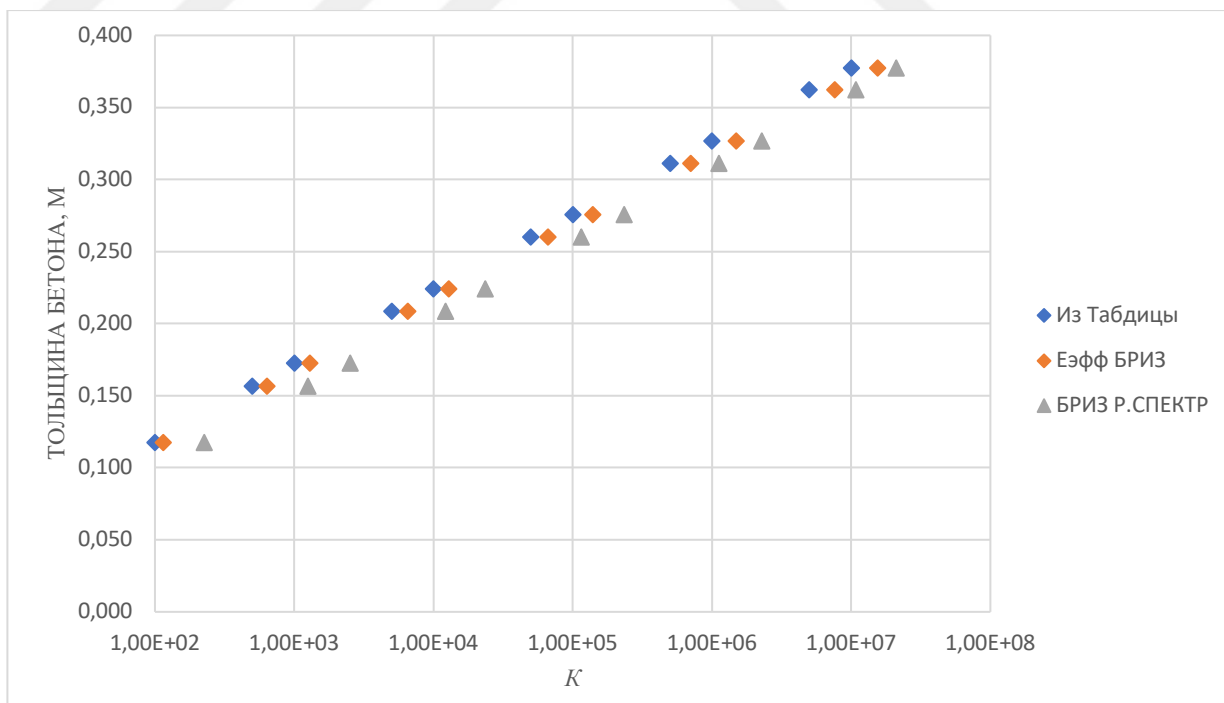


П8. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины железа для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 15 МэВ

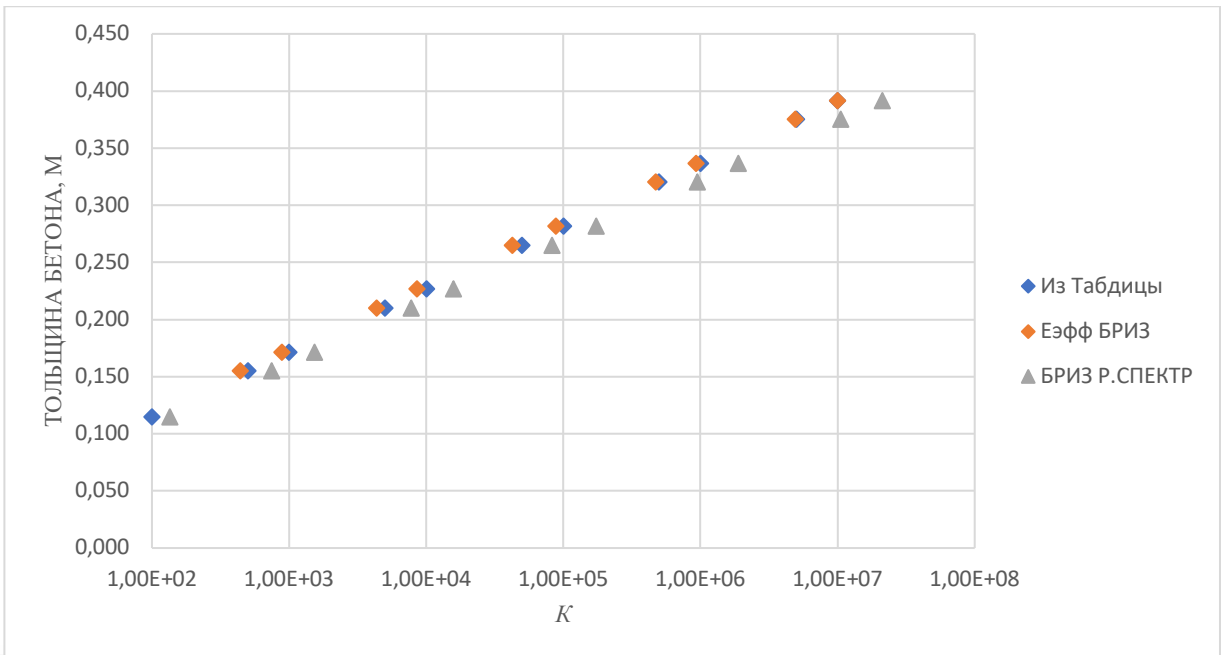
в. Графики для свинца



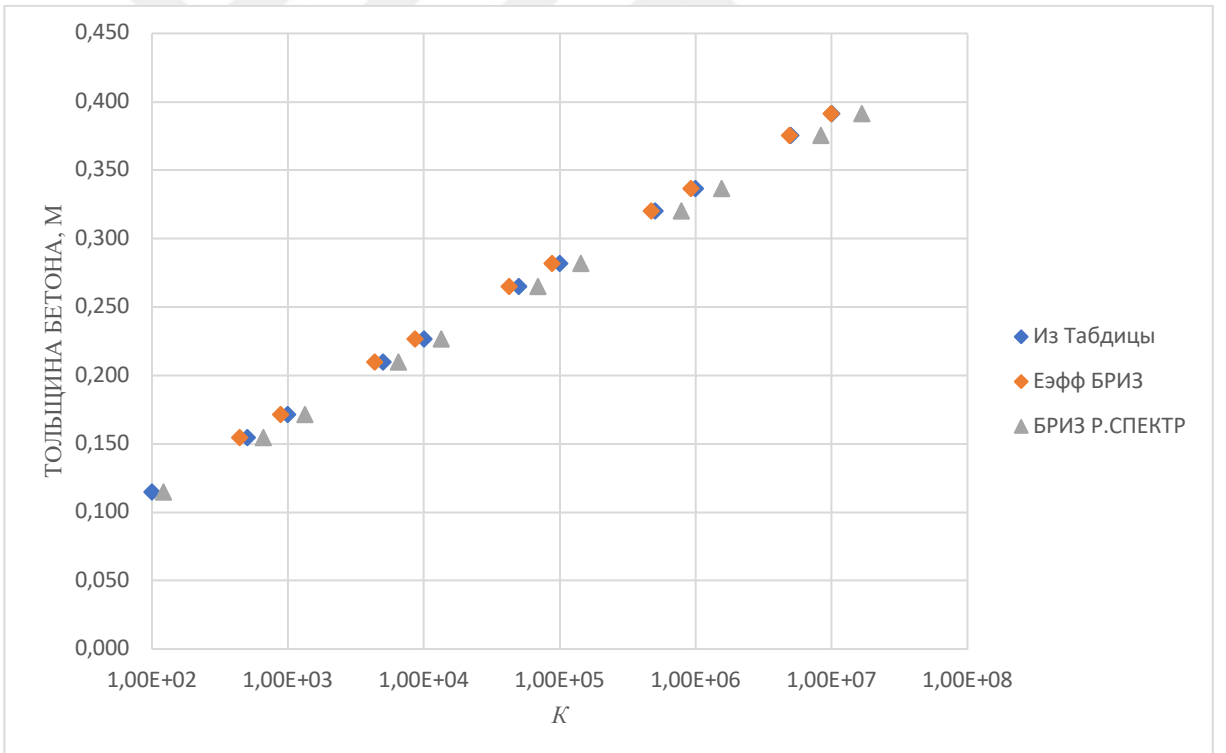
П9. График кратности ослабления для свинца (Из таблицы 1.3, $E_{эфф}=0,667$ МэВ, Реальный спектр 1 МэВ)



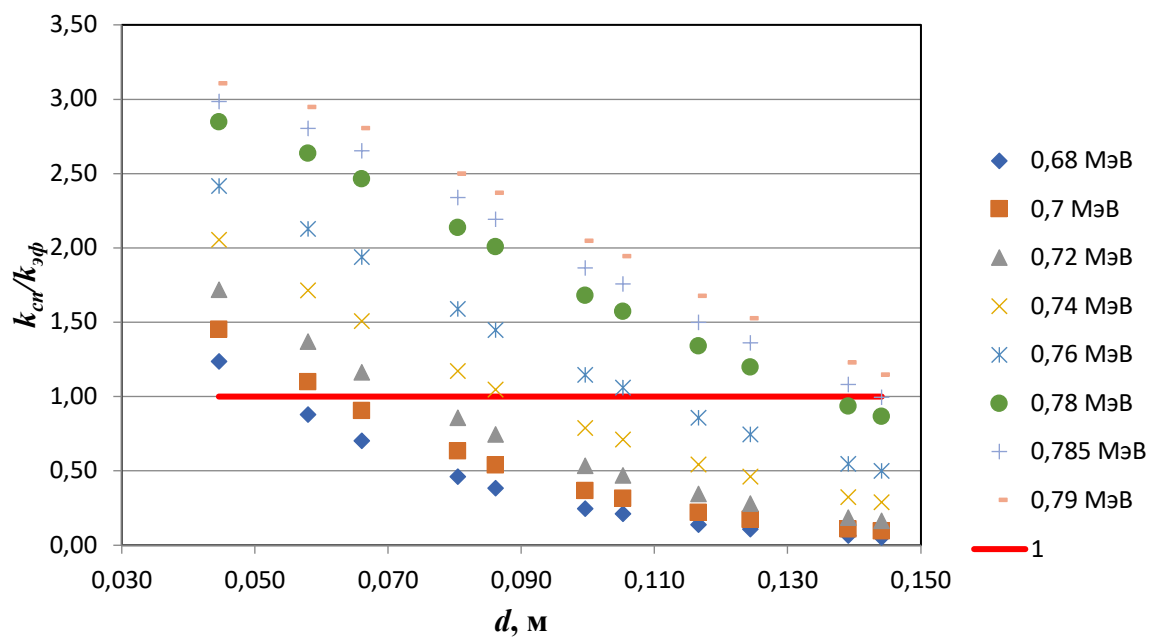
П10. График кратности ослабления для свинца (Из таблицы 1.3, $E_{эфф}=2,5$ МэВ, Реальный спектр 5 МэВ)



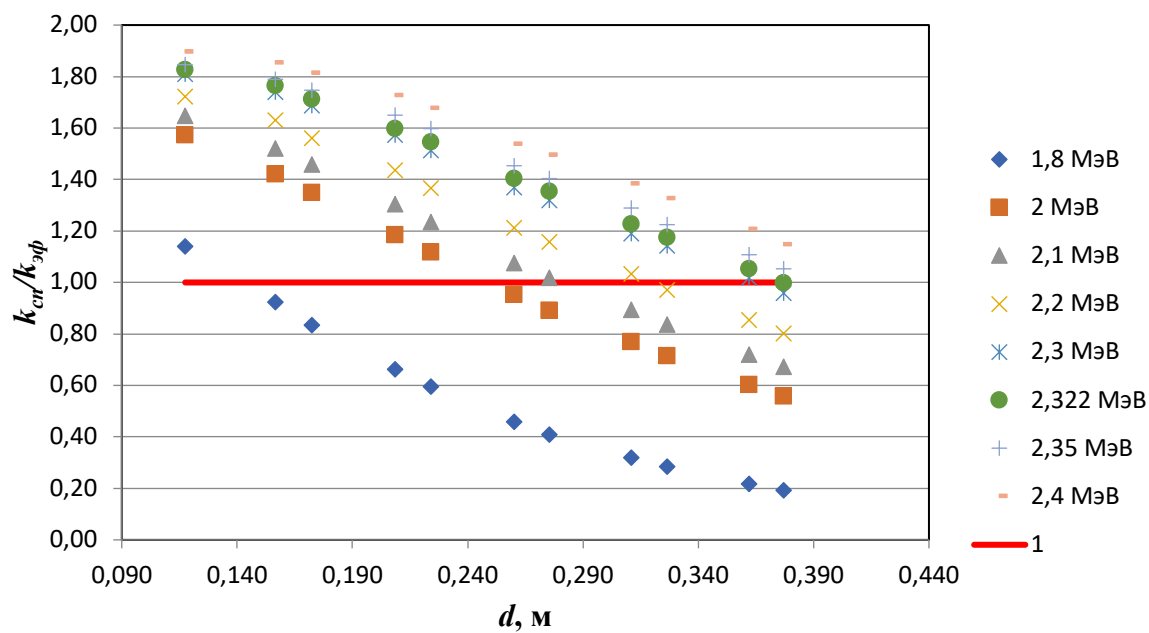
П11. График кратности ослабления для свинца (Из таблицы 1.3, $E_{эфф}=5$ МэВ, Реальный спектр 10 МэВ)



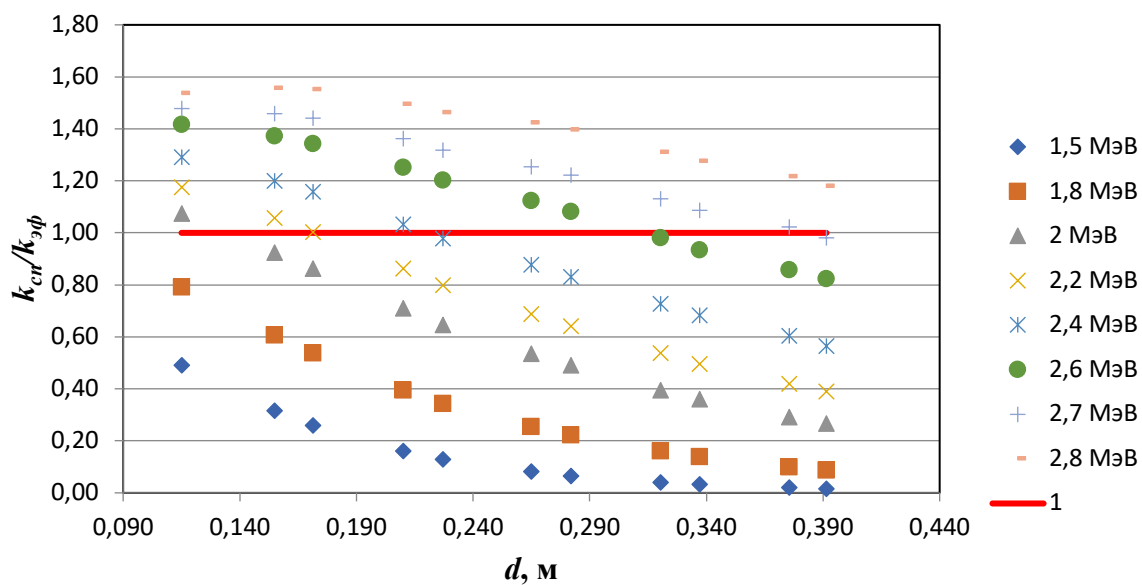
П12. График кратности ослабления для свинца (Из таблицы 1.3, $E_{эфф}=5$ МэВ, Реальный спектр 15 МэВ)



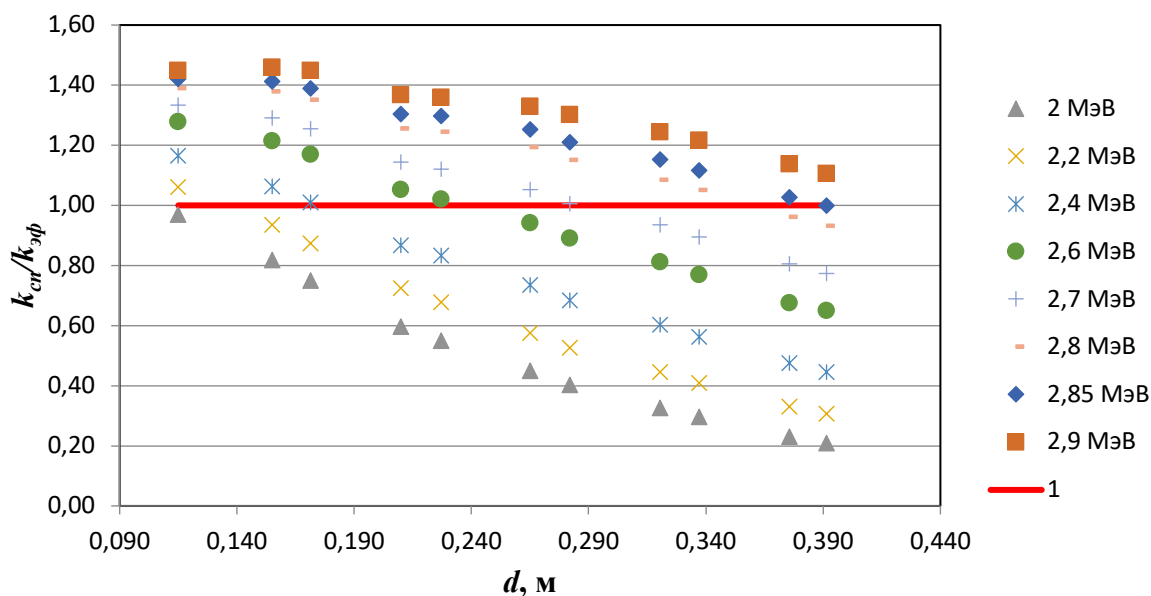
П13. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины свинца для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 1 МэВ



П14. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины свинца для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 5 МэВ



П15. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины свинца для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 10 МэВ



П16. График зависимости относительной кратности ослабления от толщины свинца для гамма-квантов тормозного излучения с граничной энергией 15 МэВ