27602-88
27603-88
27604-88
27605-88

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ
СОЮЗА ССР

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ГОСТ 27602-88 — ГОСТ 27605-88

(МЭК 544.1—77, МЭК 544.2—79,
МЭК 544.3—79, МЭК 544.4—85)

Издание официальное

Цена 15 коп. БЗ 1—88/100—103

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ
Москва

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.315.61.001.4:006.354 Группа Е39

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ

Методы определения влияния ионизирующего излучения

Electrical insulating materials. Methods for determining the effects of ionizing radiation

ГОСТ 27602—88 (МЭК 544.1—77)

ОКП (ОКСТУ) 8491

Срок действия с 01.01.89 до 01.01.94

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Часть 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

1. ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

В настоящем стандарте широко представлены проблемы, связанные с оценкой влияния ионизирующего излучения на электроизоляционные материалы всех типов. Стандарт является руководством по дозиметрической терминологии, методам определения экспозиционной и поглощенной дозы, а также методам расчета поглощенной дозы.

Раздел 1. ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ОЦЕНКОЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2. ИЗМЕНЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ РАДИАЦИЕЙ

Хотя различные типы излучения действуют на вещество поразному, первичным процессом является процесс возникновения ионов и электрически возбужденного состояния молекул, что, в свою очередь, приводит к образованию свободных радикалов. Последующие химические изменения показывают результаты взаимодействия излучений с веществом материала.

Издание официальное Перепечатка воспрещена

© Издательство стандартов, 1988

2.1. Постоянные изменения

Постоянные эффекты, обусловленные химической реакцией, изменяются в зависимости от поглощенной дозы и в некоторых ситуациях зависят от мощности дозы. Часто эти эффекты зависят как от условий окружающей среды, так и от механических нагрузок, воздействующих на материал во время облучения. В результате ухудшаются механические свойства, что часто сопровождается значительными изменениями электрических свойств.

2.1.1. Для большинства электротехнических применений вполне возможно, что ухудшение механических свойств будет основным критерием для оценки радиационной стойкости. Однако изменения tgδ или диэлектрической проницаемости (например, в резонансной схеме) могут быть очень серьезными.

2.2. Временные изменения

Временные влияния облучения определяются, прежде всего, изменениями электрических свойств, таких как наведенная проводимость как во время облучения, так и спустя некоторое время после него. Эти эффекты, прежде всего, зависят от мощности дозы облучения.

2.2.1. Проводимость при постоянном токе, которая наблюдается во время облучения, связана, по-видимому, с мобильными электронами, которые генерируются в результате облучения. Стойкость эффекта в течение длительного времени после облучения объясняется содержанием электронов, образующихся в результате облучения, которые во время облучения улавливаются в участках с низкой потенциальной энергией. Они медленно выходят из своих потенциальных ям и рекомбинируют с противоположно заряженными катионами.

3. ОЦЕНКА ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для органических соединений поглощенная доза является параметром первостепенного значения, так как эффекты от радиации, наблюдающиеся в таких материалах, в большинстве случаев пропорциональны поглощенной энергии. Однако экспериментально обычно бывает удобнее измерять плотность потока энергии поля излучения, по которой можно рассчитать поглощенную дозу. Для излучений различных типов поле излучений описывается по-разному.

Поле заряженных частиц или нейтронное поле обычно характеризуется мощностью потока, т. е. количеством частиц, проходящих через единицу площади поперечного сечения за единицу времени.

В тех случаях, когда энергия частиц имеет разные значения, требуется дополнительная информация, касающаяся спектра

энергии частиц. Аналогичным образом можно описать поле электромагнитного излучения с помощью плотности фотонного потока и распределения энергии. Однако для рентгеновских и гамма-лучей поле обычно характеризуется эффектом ионизации воздуха. Для этой цели JCRU дала количественное определение «экспозиции», взяв за единицу измерения рентген (см. пп. 6.2 и 11.2).

3.1. Во всех случаях характеристику радиационного поля излучения надо дать таким образом, чтобы можно было произвести расчет полученной дозы при помещении любого материала в данное поле. Необходимо установить стандартные методы измерения характеристик радиационных полей, воздействие которых должны испытывать электроизоляционные материалы. Разд. 2 отвечает этому требованию и является своеобразным перечнем радиационных дозиметрических методов с соответствующими ссылками.

4 ОЦЕНКА ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ И МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

В настоящее время усовершенствованы методы оценки, позволившие получать данные для расчета поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы облучения, путем оценки с помощью таких детекторов, как ионизационные камеры, калориметры или химические дозиметры.

В разд. 2 приведены надежные и удобные методы таких измерений, а в разд. 3 содержатся данные, включая зависящие от энергии факторы, которые используются при расчетах. Однако в разд. 3 рассматривается только фотонное излучение. Природа воздействия, обусловленная нейтронами с энергией менее 1 МэВ, различна. Большая часть энергии передается в данном случае в виде упругого рассеивания и переноса зарядов и не имеет отношения к воздействию фотонной радиации.

5. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

5.1. Постоянные эффекты

Цель стандартизации испытательных методов — создание единообразных методов, которые следует использовать при определении относительной радиационной стойкости электроизоляционных материалов. Рабочий индекс может быть механический и (или) электрический в зависимости от основной функции материала при его использовании.

5.1.1. *Методы испытаний и образцы*

В публикации МЭК 216 говорится следующее: «Для удовлетворительной работы электроизоляционные материалы долж-

ны обладать необходимым сочетанием физических, химических и диэлектрических свойств, а эти свойства должны быть характерны для каждого применения, для каждого вида изоляции». Таким образом, например, для полиэтилена измерения его механических и электрических свойств на листовых образцах должны быть достаточными, чтобы охарактеризовать изменения, обусловленные излучением, в то время как для слоистых труб необходимы другие методы испытаний. Для эмалированных проводов в качестве удовлетворительных методов оценки могут быть проведены испытания на изгиб на оправке, истирание и пробой скрученной пары.

5.1.2. *Условия окружающей среды*

Как указывалось выше, и рабочая температура (во время и после облучения), и атмосфера (особенно кислород воздуха и влага) могут значительно повлиять на эффект, получаемый от действия радиации. Имеются указания на то, что на разные материалы температура оказывает различное воздействие: одни материалы подвержены ускоренному старению, другие имеют более высокую стойкость к старению в определенном диапазоне температур. Температура является также важным фактором в присутствии кислорода; при достаточно высокой температуре помимо радиационного окисления происходят нормальные процессы термического окисления. Антиоксиданты, которые обычно добавляют в изоляцию для уменьшения окисления, могут, по-видимому, терять свою активность при радиолизе. Поэтому вопрос о совместном рассмотрении нагревостойкости и стойкости к излучению актуален так же, как и положения, выдвинутые в Публикации МЭК 216.

Кислород может оказывать большее воздействие при низкой дозе мощности, чем при высокой, так как у него будет больше времени для диффузии. Таким образом, может случиться так, что при облучении некоторых материалов на открытом воздухе будут наблюдаться большие различия в результатах между кратковременным облучением дозой высокой мощности и длительным облучением дозой низкой мощности, что и подтверждается практикой.

5.1.3. *Послерадиационные эффекты*

В некоторых органических полимерах могут наблюдаться послерадиационные эффекты, обусловленные разными причинами, например постепенным распадом остаточных свободных радикалов. На подобные явления необходимо делать поправку в любой оценочной методике. Там, где во время облучения испытания проводить нельзя, их необходимо проводить через интервалы, зарегистрированные после облучения, обеспечивая хранение образцов в стандартной атмосфере лаборатории.

5.2. Временные эффекты

Измерение наведенной проводимости дело довольно тонкое, так как фотоэлектроны и комптоновские электроны в материале электродов будут стремиться исказить наведенный ток в самих образцах. Ионный ток за счет ионизированной атмосферы также будет способствовать появлению ошибок при измерениях, если не принять мер к их исключению. Необходимо сформулировать экспериментальные методы, которые, оставаясь сравнительно простыми, исключают большинство ошибок измерений.

5.2.1. Было разработано и опубликовано несколько способов, которые позволят избежать вакуумирования в измерительной ячейке, поисков самых лучших электродных материалов и конфигураций образца; различные методы с идентичными образцами должны быть тщательно оценены до того, как можно будет предложить конкретные рекомендации.

5.2.2. После четкого определения большинства практических методов необходимо установить критерий чувствительности к излучению. Удобно пользоваться простой величиной, такой как наведенная проводимость (σ_i) на единицу мощности дозы, или σ_i/σ_0 — отношение к темновой проводимости (σ_0), измеренные в тех же самых экспериментальных условиях (поле, температура, окружающая среда и т.д.).

5.2.3. Опыт показал, что наведенная проводимость обычно бывает не совсем пропорциональна поглощенной мощности дозы (обозначена $\dot{D}$), а изменяется в отношения $\dot{D}^a$, где a меньше единицы. Отсюда чувствительность к излучению можно представить виде зависимости $\sigma_i = K\dot{D}^a$. Для того, чтобы определить K и a, требуется, по меньшей мере, два измерения. Дальнейшие осложнения возникают из того факта, что K и a также зависят от интегральной дозы, поглощенной образцом.

Раздел 2. РУКОВОДСТВО ПО ДОЗИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДАМ, СВЯЗАННЫМ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

6. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

6.1. Как указано в разд. 1 настоящего стандарта, для того чтобы сравнивать влияния различных видов облучения на свойства различных электроизоляционных материалов, необходимо определить дозу, поглощаемую материалом. Разные материалы, подверженные воздействию одного и того же потока фотонов или частиц, могут поглощать различные количества энергии.

6.2. Поскольку непосредственные измерения дозы, поглощенной материалом, обычно невозможны, измеряют или степень воздействия, или поглощаемую мощность дозы в стандартном материале (таком как воздух), затем измерения переводят в по-

глощенную дозу в образце методами, описанными в следующем разделе.

6.3. Экспозиция X является отношением dQ к dm, где dQ — абсолютная величина общего заряда ионов одного знака, имеющихся в воздухе, при условии, что все электроны (отрицательные и положительные), освобожденные фотонами в элементе объема воздуха с массой dm, полностью затормаживаются в воздухе.

$$X = \frac{dQ}{dm}.$$

За единицу экспозиции принят рентген (R); его определение дано в п. 11.2.

7. АБСОЛЮТНЫЕ МЕТОДЫ

Абсолютные методы дают возможность определить экспозиционную или поглощенную дозу при помощи физических измерений, не зависящих от калибровки прибора в известном поле излучения. Это определение не подразумевает точности абсолютного метода; на основе результатов изучения измерительных методов и основных реакций, вызванных излучением, созданы три абсолютных метода, которые легли в основу первичных дозиметрических стандартов Эти методы, как правило, не используются в исследованиях радиационных эффектов, но они приведены в национальных и международных стандартах и предназначены для калибровки источников излучений. Для фотонных источников точность калибровки находится в пределах 2—3%.

7.1. Ионизационная камера со свободным воздухом используется исключительно для измерения экспозиции X, т. е. камера служит для измерения величины заряда dQ, образовавшегося в воздухе, и массы к массе dm воздуха, в котором освобождены ионизирующие электроны.

7.2. Резонаторная ионизационная камера является индикатором излучения, который может использоваться для измерения экспозиционной дозы, на основе чего можно рассчитать поглощенную дозу, если величина $\dot{D}$ не будет слишком высокой и если будут обеспечены условия электронного равновесия. Если камера используется для измерения поглощенной дозы в определенной среде, то для этой среды необходимо подобрать как соответствующие стенки, так и газ. Для определенного типа излучения подбирают материал двух видов, если поглощение этого излучения приводит к тем же плотностям потока и энергетическому распределению вторичных ионизирующих частиц как в одной среде, так и в другой.

7.3. Другими методами, предназначенными для определения поглощенной дозы, которые могут использоваться в качестве

надежных стандартных методов для проведения сравнения между различными лабораториями, являются калориметрический метод и метод химической реакции, последний является вторичным методом.

7.3.1. Калориметрические системы действуют на основе энергии, поглощенной от поля излучения, в котором они находятся; эта энергия сохраняется до тех пор, пока она не перейдет в тепловую энергию. Количество этого тепла оценивается измерением повышения температуры системы. Теплоемкость системы калибруется электрически путем измерения количества поступающей электрической энергии, требующейся для получения того же возрастания температуры, что и в результате излучения. В некоторых системах был отмечен переход энергии излучения в химическую, создающий наибольшие отклонения, для устранения которых можно сделать соответствующие поправки. Поскольку превращение поглощенной энергии излучения в тепловую устанавливает систему, которая измеряет выделение энергии почти независимо от количества радиации, калориметрическая система представляет собой абсолютный метод, по которому калибровались другие стандартные методы.

8. ВТОРИЧНЫЕ МЕТОДЫ

Кроме первичных стандартных методов, есть другие методы, которые стали широко применяться как вторичные. Методы основаны на большом разнообразии поддающихся измерению химических реакций или превращений энергии, сообщаемой данному материалу как результат воздействия поля излучения. В тех случаях, когда требования к точности измерений невелики, вторичные методы имеют определенные преимущества.

8.1. Дозиметрия химических превращений основана на том принципе, что после облучения имеют место окисление и реакции восстановления в степени, прямо пропорциональной поглощенной дозе. Ферросульфатный метод с использованием дозиметра Фрике является широко распространенным и наиболее надежным. Большое значение имеют другие системы, поскольку они позволяют расширить рамки ферросульфатного метода. Наиболее полезным и надежным методом из этих систем является цериевосульфатный метод.

9. ТАБУЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

В таблице приложения А приведен неполный перечень абсолютных и вторичных методов с некоторыми основными характеристиками, такими, например, как:

тип измерения (поглощенная доза или мощность поглощенной дозы);

диапазон поглощенных доз или мощности поглощенной дозы;

влияние энергии излучения;

влияние температуры;

наблюдения, представляющие практический интерес.

9.1. Так как дозиметрия излучения пока еще является областью активных исследований, в данный стандарт невозможно было включить все разработанные методы. Точно также в стандарте не приведены все инструкции, необходимые для проведения дозиметрических измерений при помощи какого-нибудь из описанных методов. В перечень, в основном, включены методы, принятые как национальными, так и международными стандартами; в перечне также указаны диапазоны, принятые в настоящее время. Трудности, присущие дозиметрии при высоких поглощенных дозах или высоких мощностях поглощенных доз — обычное явление при облучении электроизоляционных материалов, возникают из возможных радиационных эффектов или повреждений деталей дозиметров (например, повреждение изоляции ионизационных камер). Специальные методы испытания могут понадобиться во избежание подобных осложнений.

Раздел 3. РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ОТ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

10. ЦЕЛЬ

10.1. Настоящий стандарт устанавливает метод расчета поглощенной материалом дозы на основе данных поля рентгеновского и гамма-излучений и композиционного состава материала. На основе величины поглощенной дозы для одного материала можно рассчитать поглощенную дозу для другого материала, подвергнутого воздействию того же самого поля излучения. Методика ограничивается использованием полей электромагнитного излучения в диапазоне от 0,1 до 3 МэВ.

11. ВЕЛИЧИНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ

11.1. Экспозиция является мерой поля излучения, воздействию которого подвержен материал, в то время как поглощенная доза — это мера энергии, сообщенной материалу, подверженному облучению. Поэтому поглощенная доза является основным параметром для оценки воздействия излучения на материал. Для того чтобы легче измерить дозу, поглощенную материалом, необходимо достигнуть равновесия заряженных частиц (см. приложение В).

11.2. Экспозиция определяется только для полей рентгеновского и гамма-излучений. Единицей экспозиции $\left(X=\frac{dQ}{dm}\right)$ является рентген (Р); $1Р=2{,}58\times10^{-4}$ Кл/кг. Рентген в цифровом отношении идентичен старой единице, под которой понималась доза, при которой в 0,001293 г воздуха образуются ионы с суммарным зарядом в одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака.

Таким образом, экспозиция описывает влияние поля электромагнитного излучения на вещество посредством ионизации, которую создает излучение в воздухе — стандартном контрольном материале. Использование термина «экспозиция» официально не было распространено до обозначения воздействия со стороны полей излучений других типов; отсюда неправильное его использование в других случаях помимо электромагнитного излучения. Поскольку экспозиция применима лишь к электромагнитному излучению, необходимо использовать другие величины, чтобы можно было описать условия, в которых происходит облучение частицами. Как для нейтронного, так и для электронного облучения описание поля ионизации обычно дается посредством количества частиц и их энергии.

11.3. Поглощенная доза выражается посредством энергии, сообщенной облучаемому материалу, независимо от природы ионизационного поля.

Поглощенная доза D — это отношение $d\bar{\varepsilon}$ к dm, где $d\bar{\varepsilon}$ — средняя энергия, сообщаемая ионизирующим излучением веществу в элементе объема, а dm — масса вещества в этом элементе объема.

Поэтому единой единицы будет достаточно для всех типов излучения. Эта единица — рад; 1 рад $=10^{-2}$ Дж/кг.

Дж/кг — единица СИ.

Поскольку в приведенном определении не указывается поглощающий материал, то единица рад может применяться лишь со ссылкой на определенный материал. Поглощенная доза, выраженная в радах, определяется композиционным составом облучаемого материала.

Поэтому при облучении в том же самом радиационном поле различные материалы обычно получают различные поглощенные дозы.

12. РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЭКСПОЗИЦИИ (ЭКСПОЗИЦИОННОЙ ДОЗЫ)

12.1. Облучение электроизоляционных материалов фотонным излучением при энергии менее 3 МэВ часто характеризовалось экспозицией, измеряемой в свободном воздухе вместо образца.

Поскольку поглощенная доза стала основной для сравнения эффектов от различных видов ионизирующих излучений, стало необходимо проводить оценку поглощенной дозы в материале, подверженном облучению. Экспозиция, измеренная в свободном воздухе вместо образца, может быть использована как промежуточная информация, которая позволяет произвести расчет поглощенной дозы. Ниже приведены формулы, которые следует использовать при расчете. В табл. 1 и 2 приведены цифровые данные.

12.2. В табл. 1 приведены значения f_i (поглощенная доза в рад на единицу экспозиции в рентгенах) для энергии фотонов между 0,1 и 3,0 МэВ для перечисленных элементов (см. в приложении С отклонения от значений f_i). Значения f_i будут справедливыми лишь в условиях равновесия заряженных частиц (см. приложение В).

12.3. Поглощенную дозу на единицу экспозиции для любого материала с известным композиционным составом можно рассчитать, пользуясь методикой, приведенной ниже.

12.3.1. Определить долю массы элементов в материале.

12.3.2. Из табл. 1 получить значения f_i для элементов в материале для данной энергии фотонов.

12.3.3. Подставить эти значения и соответствующие доли массы в следующее уравнение для f_m

$$f_m = \sum_i a_i f_i,$$

где f_m — отношение поглощенной дозы к экспозиционной в материале, рад/Р;

a_i — доля массы элемента в материале;

f_i — поглощенная доза на единицу экспозиционной дозы для элемента.

12.3.4. Для получения поглощенной материалом дозы значение, полученное для f_m, следует умножить на экспозицию в рентгенах (полученную в результате ее измерения). Таким образом, $D_m = X \cdot f_m$.

12.4. Предположим, например, что требуется произвести расчет поглощенной дозы политетрафторэтиленовой (ПТФЭ) пленкой, соответствующей облучению 10^6 Р фотонами с энергией 1 МэВ, причем экспозиция определялась с использованием воздушной ионизационной камеры с толщиной стенок, гарантирующей «равновесие заряженных частиц». Ссылка в приложении В (см. п. В 1.2) указывает на необходимость использования поглотителя (стенки камеры) толщиной 0,50 см из материала с плотностью электронов порядка $3{,}3 \times 10^{23}$ э/см^3 или 0,22 см материала с плотностью электронов $7{,}6 \times 10^{23}$ э/см^3, или соответствующих сочетаний толщины и плотности для получения эквивалентного результата.

12.4.1. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) имеет эмпирическую формулу $(CF_2)_n$ (не принимая во внимание концов цепи, ненасыщенность и примеси), отсюда доли массы C и F составляют соответственно 0,24 и 0,76.

12.4.2. В табл. 1 даны $f_C=0{,}866$ рад/Р и $f_F=0{,}822$ рад/Р для фотонов с энергией 1 МэВ. Эти показатели лежат в пределах $\pm 0{,}5\%$.

12.4.3. Подставив эти значения в уравнение, получим: $f_{CF_2}= (0{,}24\times 0{,}866) + (0{,}76\times 0{,}822) - 0{,}83$ рад/Р. Поэтому облучение 10^6 Р дает поглощенную дозу в этом материале $0{,}83\times 10^6$ рад.

12.4.4. Для различных органических соединений, подвергнутых облучению фотонами с энергией в диапазоне между 0,5 и 1,5 МэВ, уравнение в п. 12.3.3 может быть приближенно представлено следующим образом:

$$f_m=0{,}85\ a_H + 0{,}05\ a_F - 0{,}04\ a_C + 0{,}03\ a_O + 0{,}87.$$

12.5. В табл. 2 представлены результаты расчетов для некоторых часто используемых материалов при уровне энергии фотонов порядка 1 и 0,1 МэВ.

13. РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ОДНОМ МАТЕРИАЛЕ НА ОСНОВЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ДРУГОМ МАТЕРИАЛЕ

13.1. Данные табл. 1 можно также использовать для сравнения поглощенной дозы в различной среде без ссылки на экспозицию при условии, что последняя поддерживается постоянной. Из уравнения (2) приложения С видно, что при постоянной одной и той же экспозиции отношение между f_i для каких-то двух типов среды равняется отношению между их массовыми коэффициентами поглощения энергии $(\mu\ln/\varrho)_m$, отсюда следует, что данное отношение равняется отношению между поглощенными дозами. При применении химической дозиметрии измеренные химические изменения можно непосредственно перевести в поглощенную дозу в радах. Используя отношение между показателями f_m, можно произвести расчет поглощенной дозы в любом материале на основе поглощенной дозы в химическом дозиметре, когда известна энергия фотонов (в пределах границ, обозначенных в п. 14).

13.2. Например, если измерить поглощенную дозу в дозиметре Фрике (см. приложение А), она составит $5{,}0\times 10^5$ рад в течение 1 ч облучения в облучателе ^{60}Co и потребуется определить поглощенную дозу в образце полиэтилена в том же самом облучателе в течение 1 ч, то расчет производят следующим образом.

13.2.1. Дозиметр Фрике имеет массовое распределение H, O и S порядка 0,11; 0,88 и 0,013 соответственно. Эмпирическая формула для полиэтилена будет (CH_2), а массовая доля C и H составляет соответственно 0,86 и 0,14.

13.2.2 Из табл. 1 $f_H = 1.72$, $f_O = 0{,}869$, $f_S = 0{,}869$ и $f_l = 0{,}866$ для энергии фотонов 1,0 МэВ.

13.2.3. Подставив эти значения в уравнение (3) приложения С, получим следующее:

$$f_{CH_2} = (0{,}86 \times 0{,}866) + (0{,}14 \times 1{,}72) = 0{,}986 = 0{,}99 \text{ рад/Р}$$

и $f_{\Phi\text{рике}} = (0{,}11 \times 1{,}72) + (0{,}88 \times 0{,}869) + (0{,}013 \times 0{,}869) = 0{,}96$ рад/Р.

Отношение $f_{CH2}/f_{\Phi\text{рике}} = 0{,}99/0{,}96 = 1{,}02$, поэтому поглощенная доза в полиэтилене будет равняться

$$1{,}02 \times 5{,}0 \times 10^5 \text{ рад} = 5{,}10 \times 10^5 \text{ рад}.$$

13.3. Данные табл. 2 могут быть также использованы для подсчета поглощенной дозы в любом из приведенных материалов в поглощенную дозу в любом другом материале при условии, что энергия излучения составляет 0,1 МэВ или лежит между 0,5 и 3 Мэв. Например, если оказалось, что поглощенная доза в полиэтилене, подверженном облучению в облучателе ^{60}Co, составляет 5.10×10^5 рад, и требуется определить дозу, которая будет поглощена образцом из поливинилхлорида (ПВХ) в таком же облучателе в течение такого же времени, то единственное, что требуется сделать — это умножить известную поглощенную дозу на соотношение между f_m для указанных материалов

$$f_{\text{ПВХ}} = 0{,}89 \text{ рад/Р}; \quad f_{CH_2} = 0{,}99 \text{ рад/Р}.$$

Поэтому

$$D_{\text{ПВХ}} = \frac{f_{\text{ПВХ}}}{f_{CH_2}} \times 5{,}10 \times 10^5 \text{ рад} = \frac{0{,}89}{0{,}99} \times 5{,}10 \times 10^5 = 4{,}58 \times 10^5$$

рад — доза, поглощенная образцом из поливинилхлорида.

14. ОГРАНИЧЕНИЯ

14.1. Так как распределение поглощенной дозы по образцу, подверженному облучению, будет изменяться и является функцией толщины образца, его плотности и энергии излучения, необходимо решить, какие погрешности дозы мы можем допустить по мере того, как излучение проникает в образец. Наиболее часто использующиеся установки по облучению имеют источники излучения в диапазоне от 0,5 до 1,5 МэВ. Если произвольно установить предел в 10% для различия между поглощенной дозой спереди и сзади образца (10%-ное затухание по образцу), то тогда толщина образца должна ограничиваться до 1,1 см для энергии 0,5 МэВ и 1,8 см — для 1,5 МэВ, допуская отсутствие прироста и наличие образца с плотностью электронов порядка

$3{,}3\times10^{23}$ э/см³ (электронная плотность воды при 25°С). См. примечание в приложении В.

14.2. На рис. 3 представлен график зависимости энергии фотонов от толщины образца для 10 и 25%-ного затухания для образца с плотностью, равной единице и $3{,}3\times10^{23}$ э/г (т. е. H_2O). Кривые на рис. 3 будут сдвигаться влево для материалов с более высокой плотностью электронов. Значение толщины образца для 10 и 25%-ного затухания, полученное по рис. 3, делят на отношение плотности электронов образца на $3{,}3\times10^{23}$ э/г.

Примечание. Все значения, приведенные выше, справедливы лишь для материалов, состоящих из элементов с атомным номером меньше 18.

Таблица 1

Поглощенная доза на единицу экспозиции, рад/Р

$$f_i = 0{,}869\ \frac{(\mu\ln)_i}{(\mu\ln/\rho)_{воз}}.$$

Энергия фотонов, МэВ	H	C	N	O	F	Si	S	Cl	P
0,10	1,53	0,802	0,835	0,873	0,896	1,67	2,25	2,56	1,88
0,15	1,67	0,852	0,862	0,872	0,845	1,06	1,22	1,26	1,09
0,20	1,71	0,866	0,866	0,879	0,833	0,947	1,00	1,00	0,947
0,30	1,72	0,869	0,872	0,872	0,823	0,893	0,909	0,950	0,875
0,40	1,72	0,866	0,869	0,869	0,822	0,878	0,884	0,855	0,851
0,50	1,72	0,869	0,869	0,869	0,822	0,866	0,878	0,845	0,843
0,60	1,72	0,869	0,869	0,869	0,825	0,869	0,872	0,839	0,843
0,80	1,72	0,866	0,869	0,869	0,823	0,866	0,863	0,833	0,843
1,0	1,72	0,866	0,869	0,869	0,822	0,863	0,869	0,828	0,837
1,5	1,72	0,869	0,869	0,869	0,821	0,869	0,866	0,824	0,835
2,0	1,72	0,869	0,869	0,869	0,824	0,873	0,873	0,835	0,846
3,0	1,68	0,865	0,869	0,873	0,830	0,890	0,890	0,865	0,865

Таблица 2

Поглощенная доза на единицу экспозиции как функция от состава материала и энергии фотонов

Материал	Эмпирическая формула	$f_{ин}$, рад/Р	
		1 МэВ	0,1 МэВ
Полистирол	$(CH)_n$	0,94	0,86
Полиэтилен	$(CH_2)_n$	0,99	0,90
Полиамид (е-амино-капроновая кислота)	$C_5H_{11}ON)_n$	0,95	0,89

Продолжение табл. 2

Материал	Эмпирическая формула	f_m, рад/Р	
		1 МэВ	0,1 МэВ
Полидиметилсилоксан	$(C_2H_6OSi)_n$	0,93	1,21
Этиленполисульфид	$(C_2H_4S_4)_n$	0,90	2,01
Сополимер винилиденхлорида	$(C_4H_6Cl_2)_n$	0,87	2,00
Политетрафторэтилен	$(CF_2)_n$	0,83	0,87
Полихлортрифторэтилен	$(C_2F_3Cl)_n$	0,83	1,38
Поливинилхлорид	$(C_2H_3Cl)_n$	0,89	1,82
Поливинилиденхлорид	$(C_2H_2Cl_2)_n$	0,86	2,10
Поливинилпиролидон	$(C_6H_9NO)_n$	0,94	0,87
Поливинилкарбазол	$(C_{14}H_{11}N)_n$	0,92	0,85
Поливинилацетат	$(C_4H_6O_2)_n$	0,93	0,88
Полиметилметакрилат	$(C_5H_8O_2)_n$	0,94	0,88
Трибутилфосфат	$(C_4H_9)_3PO_4$	0,95	1,02
Дозиметр Фрике	—	0,96	0,96

Примечание. Приведенные данные можно также использовать для ^{60}Co и ^{137}C гамма-лучей и для рентгеновских лучей с энергией 2—3 МэВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Методы, рекомендуемые для измерения поглощенной дозы электромагнитного излучения в полимерных материалах

Метод	Тип измерения	Диапазон поглощенных доз, рад	Диапазон мощности дозы, рад/ч	Влияние энергии	Влияние температуры	Пояснения
			Абсолютные методы			
Калориметры	Доза или мощность дозы	10^{-1}–10^{8}	От 10^{3} примерно	Не зависит от энергии	Не влияет	Адиабатический тип наиболее приемлем. Высокая точность с термисторными датчиками. Непосредственное электрическое считывание, хорошо пригодное для полей с высокой интенсивностью
Ионизационная	То же		От очень низкого до 10^{8}; ограничивающим фактором является потеря зарядов в результате рекомбинации ионов	Устанавливается изготовителем	»	Непосредственное электрическое считывание. Очень точный метод, пригодный для измерения низкой дозы и мощности дозы

Продолжение

Метод	Тип измерения	Диапазон поглощенных доз, рад	Диапазон мощности дозы, рад/с	Влияние энергии	Влияние температуры	Пояснения
			Вторичные методы			
			Химическая конверсия			
Сульфат окиси железа (дозиметр Фрике)	Доза	2×10^3 до 4×10^4	До 10^7	Не зависит от энергии в диапазоне от 0,66 до 16 МэВ	Незначительное влияние в диапазоне от 0 до 50°С во время облучения, очень чувствителен к спектрофотометрическому считыванию	Легко подготавливается в лаборатории. Спектрофотометрическое измерение. Рекомендуется для рентгеновского и гамма-излучения, за исключением тех случаев, когда мощность излучения слишком высока, чтобы было легко получить 50000 рад
Цериевый сульфат	То же	От 5×10^4 до 10^5	До 10^9	То же	Незначительное влияние на выходе при температуре выше комнатной	Чувствителен к примесям. Обращаться следует с особой осторожностью
Щавелевая кислота	»	От 10^5 до $1{,}6\times10^6$	До $3{,}5\times10^8$	»	Не оказывает влияния при температуре от 15 до 80°С	Нейтронная активация не принимается во внимание. Наиболее подходящ для измерений пучков
Окись азота	»	От 10^4 до 3×10^5	До 10^6	Не влияет	Не оказывает влияния при температуре от минус 18 до плюс 200°С	Готовится в лаборатории. Процесс простой. Измерение текучести газа

Продолжение

Метод	Тип измерения	Диапазон поглощенных доз, рад	Диапазон мощности дозы, рад/ч	Влияние энергии	Влияние температуры	Пояснения
Циклогексан	Доза	От 10^4	До 10^9	Не влияет	Не оказывает влияния при температуре от минус 30 до плюс 100°С	Измерение текучести газа
Полиэтилен	То же	От 10^4 до 10^{10}	Не зависит от мощности в диапазоне от 10^3 до 10^8	Должна пройти через стеклянную капсулу		Измерение текучести газа, без побочных эффектов
			Фотоэлектрические устройства			
Кремниевый переход типа р п	Мощность дозы		От 10^2 до 10^{10}	Более сильная реакция на поток при низкой энергии	Чувствительность к воздействию температуры	Каждый диод требует калибровки. Прямое считывание. Потеря чувствительности в результате повреждения, вызванного излучением. Требует перекалибровки
			Фотолюминесценция			
Фосфатное стекло, активированное серебром	Доза	От 10^{-2}	По меньшей мере до 4×10^{12}	Ответная реакция на каждый рентген при 30 кэВ в 10—30 раз сильнее чем при 1,2 МэВ в зависимости от типа и размера исполь-	Необходимо учитывать коэффициенты при облучении при температуре свыше 25°С	Приборы для считывания

Продолжение

Метод	Тип измерения	Диапазон поглощенных доз, рад	Диапазон мощности дозы, рад/ч	Влияние энергии	Влияние температуры	Пояснения
				зуемых кусочков стекла. Улучшается за счет экранирования		
				Термолюминесценция		
Активированный фтористый кальций	Доза	2×10^{-3} до 4×10^{6}	По меньшей мере, до 4×10^{8}	Ответная реакция на каждый рентген при 30 кэВ примерно в 15 раз сильнее, чем при 1,2 МэВ. Улучшается за счет экранирования	Стабильный во времени пик свечения при 250°С	Требуется время (16 ч) для стабилизации после облучения
Активированный фтористый литий	То же	От 10^{-2} до 3×10^{4}	По меньшей мере, до 2×10^{8}	Ответная реакция на каждый рентген при 50 кэВ примерно в 1,5 раза сильнее, чем при 1,2 кэВ	Стабильный во времени пик свечения при 210°С	Не пригоден для смешанных гамма-нейтронных полей

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РАВНОВЕСИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В.1. Толщина, обеспечивающая равновесие заряженных частиц

В.1.1. Если происходит облучение материала рентгеновскими или гамма-лучами, не сопровождающимися вторичными электронами, то сначала наблюдается прирост поглощения энергии (поглощенная доза) по мере того, как излучение проникает в материал. После какой-то определенной толщины материала поглощение энергии излучения снижается. Толщина, необходимая для того, чтобы достичь максимального поглощения энергии, обычно называется толщиной равновесия заряженных частиц и является функцией энергии излучения и плотности электронов в облучаемом материале. Рис. 1 является типичным графиком поглощения энергии как функции от толщины. При облучении образца со всех сторон его необходимо окружить поглотителем, чтобы обеспечить равновесие заряженных частиц по всему образцу. Однако в том случае, если образец облучать в одном направлении, то поглотитель необходимо расположить лишь с передней и с задней сторон образца. На рис. 2 представлен график толщины поглотителя как функции от энергии для материала с плотностью электронов порядка $3{,}3\times10^{23}$ э/см^3. На рис. 3 представлен график толщины слоя воды для заданного затухания облучения в одном направлении.

Примечание. Плотность электронов любого материала можно рассчитать по формуле

$$n=(\rho N_A/M)\sum_i z_i,$$

где n — плотность электронов, м$^{-3}$;

ρ — плотность материала, кг/м^3;

N_A — $6{,}023\times10^{23}$ моль$^{-1}$, постоянная Авогадро;

M — молярная масса, кг/моль;

z_i — атомный номер;

$\sum_i z_i$ — общее число электронов на каждую молекулу.

Так как $\frac{\sum_i z_i}{M}$ равняется примерно $^1/_2$ почти для всех материалов, это уравнение можно упростить и представить в следующем виде

$$n=\frac{\rho N_A}{2}=3\times10^{23}\rho.$$

Кривая, представленная на рис. 2, будет сдвигаться влево по мере того, как плотность электронов у поглотителя будет выше этого расчетного показателя, и вправо для материалов с меньшей плотностью электронов, поэтому эквивалентной толщиной будет толщина, полученная на рис. 2, разделенная на отношение плотности электронов поглотителя к $3{,}3\times10^{23}$ э/см^3.

В.1.2. Например, необходимо облучить политетрафторэтиленовую пленку фотонами с энергией 1,1 МэВ. Исходя из рис. 2 можно рассчитать, что 0,5 см материала, характеризующегося $3{,}3\times10^{23}$ э/см^3, требуется для того, чтобы обеспечить равновесие заряженных частиц, поэтому пленку должен окружать материал именно такой толщины.

ПРИЛОЖЕНИЕ С

РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В МАТЕРИАЛЕ НА ОСНОВЕ ЭКСПОЗИЦИИ (ЭКСПОЗИЦИОННОЙ ДОЗЫ)

С.1. Информация для расчета поглощенной дозы на основе экспозиции

С.1.1. Эффективность поглощения энергии материалом, подверженным воздействию рентгеновского или гамма-излучения, определяется массовым коэффициентом поглощения энергии $(\mu\ln/\delta)_m$. Ее можно определить на основе массового коэффициента истинного поглощения за счет включения лишь доли фотонной энергии, действительно поглощаемой материалом.

Когда $U\ln/\varrho$ выражена в квадратных сантиметрах на грамм, то показатель для материала, подверженного облучению, будь то соединения или смесь, может быть выражен при помощи следующего отношения

$$(\mu\ \ln/\varrho)_m=\sum_i a_i=(\mu\ \ln/\varrho)_i, \qquad (1)$$

где a_i и $(\mu\ln/\varrho)_i$ — соответственно являются долей массы и массовым коэффициентом истинного поглощения энергии для составляющей i.

С.1.2. Облучение порядка 1Р в воздухе дает поглощение порядка 86,9+0,4 эрг/г воздуха или 0,869 рад (см. примечание, приведенное ниже), если в точке, представляющей интерес, существует равновесие заряженных частиц. Для того же облучения поглощенная доза, полученная материалом, подверженным облучению, рассчитывается по следующей формуле

$$D_m=D_{воз}\frac{(\mu\ \ln/\rho)_m}{(\mu\ \ln/\rho)_{воз}}=0{,}869\ \frac{(\mu\ \ln/\rho)_m}{(\mu\ \ln/\rho)_{воз}}\ X, \qquad (2)$$

где D_m — поглощенная доза в материале;

$D_{воз}$ — поглощенная доза в воздухе;

$(\mu\ln/\varrho)_m$ — массовый коэффициент истинного поглощения энергии для материала;

$(\mu\ln/\varrho)_{воз}$ — массовый коэффициент истинного поглощения энергии для воздуха;

X — экспозиция, р.

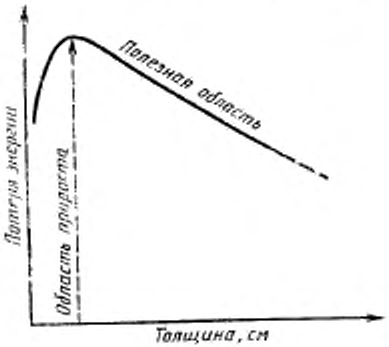
Подставив уравнение (1) в (2), получим следующее:

$$D_m=0{,}869\ \frac{\sum\limits_i a_i\ (\mu\ \ln/\rho)_i}{(\mu\ \ln/\rho)_{воз}}X=X\sum_i a_i f_i, \qquad (3)$$

где $$f_i=0{,}869\ \frac{(\mu\ \ln/\rho)}{(\mu\ \ln/\rho)_{воз}}, \qquad (4)$$

Примечание. Показатель 86,9 эрг/г воздуха основан на значении (33,7±0,2) эВ, требующимся для создания одной ионной пары в воздухе. В последние годы энергия на каждую ионную пару считалась 34,0 или 32 эВ, давая для 1 Р показатели 87,7 и 83 эрг/г воздуха. Изменения в энергии на каждую ионную пару также меняют результаты расчетов поглощенной дозы по приведенным формулам.

Поглощенная доза, как функция от толщины



Примечание. Часть кривой слева от максимума недостаточно изучена. Поэтому необходимо иметь образец, обладающий достаточной толщиной, чтобы находиться или возле максимума, или справа от него

Рис. 1

Толщина поглотителя для равновесия заряженных частиц как функция от энергии для воды (материал $3{,}3\times10^{23}$ э/см^3)

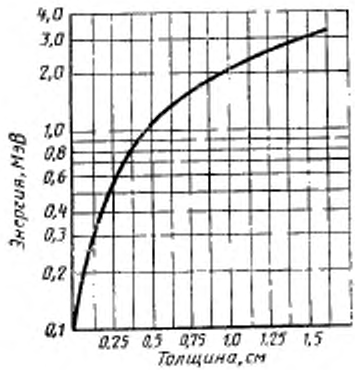


Рис. 2

Толщина слоя воды (1 г/см^3 и $3{,}3\times10^{23}$ э/г) как функция от энергии для данного затухания

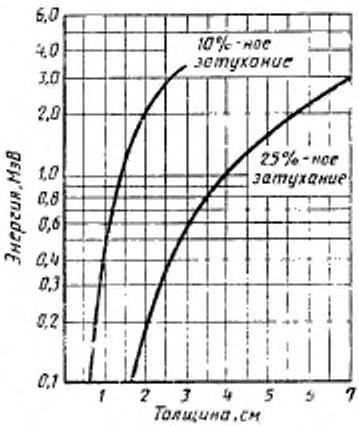


Рис. 3

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. **ВНЕСЕН** Министерством электротехнической промышленности СССР

2. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.02.88 № 388 Публикация МЭК 544.1—77 введена в действие непосредственно в качестве государственного стандарта СССР.

3. **ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ**

4. **ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ**

Обозначение НТД, на который дана ссылка	Номер пункта
ГОСТ 8865—87	п. 5.1.1.

gost.e-ecolog.ru